

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

**Robotizace manuálních operací procesu
diagnostiky statorových svazků elektromotorů**

Robotizing the Manual Procedures
of Electromotors' Stators Diagnostics

Student:

Bc. Daniel Huczala

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Krys, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robotiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Huczala**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T013 Robotika
Téma: Robotizace manuálních operací procesu diagnostiky statorových svazků elektromotorů
Robotizing the Manual Procedures of Electromotors' Stators Diagnostics
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte současný stav provádění manuálních operací při diagnostice statorových svazků elektromotorů v o.z. Siemens Frenštát p. R.
2. Proveďte rozbor požadavků a navrhnete koncept senzorického subsystému pro zjištění geometrie motoru.
3. Navrhnete testovací pracoviště a provedte simulaci aplikace na základě rámcových rozměrů elektromotorů.
4. Na realizovaném testovacím pracovišti provedte praktický test s robotem Kuka KR10.
5. Navrhnete zapracování zkušebního robotizovaného pracoviště do současné výrobní linky.
6. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému dle pokynů vedoucího.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

BURKOVIČ, J. *Navrhování robotizovaných montážních linek*. 1. vydání. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. 163 s. ISBN 978-80-248-1869-6.

PALKO, A., SMRČEK, J. *Robotika, Koncové efekторы pre priemyslné a servisné roboty, Navrhovanie – Konštrukcia - Riešenia*. 1. vydání. Košice: TU v Košiciach, 2004. 274 s. ISBN 80-8073-218-3.

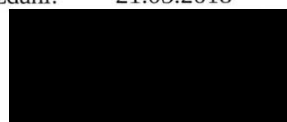
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Kryš, Ph.D.**

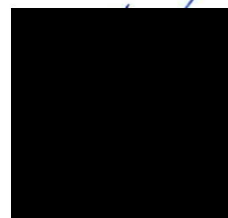
Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Pospíšilík, Ph.D.

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje firmy Elektromotory Frenštát, Siemens s. r. o. a firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 21. května 2018

A solid black rectangular box used to redact the student's signature.

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Daniel Huczala

Adresa trvalého pobytu autora práce:



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HUCZALA, D. *Robotizace manuálních operací procesu diagnostiky statorových svazků elektromotorů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2018, 74 s. Vedoucí práce: Krys, V.

Diplomová práce se zabývá návrhem rozšíření diagnostického pracoviště statorových svazků o robotizované pracoviště ve výrobním závodě společnosti o. z. Elektromotory Frenštát, Siemens s. r. o. V úvodní kapitole je analyzován současný stav diagnostických operací v závodě, následně je navržen senzorický subsystém pro nalezení osy geometrického středu statoru. Tato metodika je později simulována a otestována v reálných podmínkách užitím průmyslového robotu. Poslední kapitola práce se zabývá návrhem pracoviště s instalovaným robotem a zajištěním bezpečnosti pracoviště. Součástí dokumentace je také posouzení rizik daného pracoviště.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HUCZALA, D. *Robotizing the Manual Procedures of Electromotors' Stators Diagnostics: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2018, 74 p. Thesis head: Krys, V.

Master thesis is dealing with transformation of stators' diagnostics workplace into robotized workplace in the plant of the company o. z. Elektromotory Frenstat, Siemens s. r. o. In the first chapter the diagnosis process is analyzed and sensory subsystem for searching the stator's axis of geometric center is devised. This method is simulated and tested afterwards in real conditions using an industrial robot. The last chapter of the thesis is dealing with design of robotic cell and its safety. Risk assessment of the designed workplace is included in the documentation.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam použitých značek a symbolů	12
Slovník zkratk	13
Úvod	14
1 Analýza procesu diagnostiky statorových svazků	15
1.1 Zkušebna statorových svazků	16
1.2 Diagnostické pracoviště pro testy statorových svazků	18
1.3 Systémová komunikace a řízení na pracovištích	21
1.4 Požadavky zadavatele	22
1.4.1 Průmyslový robot Kuka KR10 R1100 sixx	23
1.4.2 Kontrolér Kuka KR C4 compact	24
2 Senzorický subsystém pro detekci geometrie svazku	25
2.1 Dostupné typy senzorů	25
2.1.1 Taktilní snímač	25
2.1.2 Silo-momentový senzor	26
2.1.3 Laserový senzor vzdálenosti	27
2.1.4 Laserový 2D/3D skener	28
2.2 Vícekriteriální analýza	29
2.2.1 Kritéria hodnocení	29
2.2.2 Hodnocení úrovní a váhy významnosti	30
2.2.3 Hodnocení jednotlivých kritérií	30
2.2.4 Určení významnosti kritérií	31
2.2.5 Sumy vážených indexů kritérií a optimální varianta	32
2.3 Závěrečné doporučení – senzor Keyence	33
3 Návrh testovací aplikace	34
3.1 Požadavkový list pro testovací pracoviště	34
3.2 Popis aplikace	35
3.2.1 Diagramy algoritmu	37
3.3 Oddálení senzoru	39
3.4 Testovací svazek plechů	39

3.5	Návrhový model rozmístění prvků testovacího pracoviště	40
4	Simulace a praktický test.....	42
4.1	Řídicí systém testovací aplikace.....	42
4.1.1	Program KRL.....	44
4.2	Výsledky simulace a praktického testu	47
4.2.1	Analýza naměřených dat.....	47
5	Návrh RTP v rámci diagnostického pracoviště.....	50
5.1	Požadavkový list pro RTP	50
5.2	Návrh úpravy diagnostického pracoviště	51
5.3	Očekávaný průběh postupu práce.....	54
5.4	Bezpečnost pracoviště	55
5.4.1	Pokyny pro zajištění bezpečnosti.....	55
5.4.2	Údržba RTP, úprava řídicí aplikace robotu	58
5.5	Bezpečnost pracovního prostoru spolupráce	58
5.5.1	Varianta A – optické senzory.....	59
5.5.2	Varianta B – laserový skener	62
5.5.3	Srovnání navržených variant.....	66
5.6	Posouzení rizik	66
5.7	Doplňující informace.....	69
6	Závěr.....	70
	Seznam použité literatury	71
	Bibliografie	72
	Přílohy.....	73

Seznam obrázků

Obr. 1	Statorový svazek	15
Obr. 2	Model zkušebny a diagnostického pracoviště.....	16
Obr. 3	Dispozice zkušebny	17
Obr. 4	Dispozice diagnostického pracoviště.....	19
Obr. 5	Diagnostické pracoviště	20
Obr. 6	Palety pro statorové svazky	22
Obr. 7	Maximální zástavbové rozměry	23
Obr. 8	Robot Kuka KR 10 R1100 sixx [1]	23
Obr. 9	Kontrolér Kuka KR C4 compact [2].....	24
Obr. 10	Schéma principu rozpoznání statoru na páse	26
Obr. 11	Schéma sekvencí pro laserový senzor	27
Obr. 12	Senzor vzdálenosti Keyence LK-G157 [3]	33
Obr. 13	Zjednodušený model statoru a robotu provádějícího inspekci	34
Obr. 14	Schéma umístění statoru na otočeném stole	35
Obr. 15	Schéma sekvencí.....	36
Obr. 16	Algoritmus 1. sekvence.....	37
Obr. 17	Algoritmus 2. sekvence.....	38
Obr. 18	Algoritmus 3. sekvence.....	38
Obr. 19	Model přípravku pro oddálení senzoru od příruby robotu.....	39
Obr. 20	Testovací svazek plechů	40
Obr. 21	Srovnání modelu s pozdějším reálným uspořádáním	40
Obr. 22	Vzdálenosti počátku SS robotu od testovacího svazku	41
Obr. 23	Prostředí Kuka.Sim Pro 3.0	42
Obr. 24	Pracovní prostředí WorkVisual 4.0	43
Obr. 25	Testovací aplikace pro ověření funkce	44
Obr. 26	Programování pohybu robotu Kuka na ovládacím panelu.....	45
Obr. 27	Záznam měření v aplikaci.....	49
Obr. 28	Pracoviště diagnostiky původně (vlevo) a s robotem (vpravo)	51
Obr. 29	Dispozice RTP	52
Obr. 30	Schéma komunikace prvků pracoviště	53

Obr. 31	Algoritmus postupu práce na pracovišti RTP	54
Obr. 32	Rozmístění nouzových vypínačů	56
Obr. 33	Doporučené rozšíření zabezpečení pracoviště o více světelných závor	57
Obr. 34	Rozdělení pracovních prostorů robotu a operátora	58
Obr. 35	Zabezpečení – varianta A: optické snímače.....	59
Obr. 36	Zvolená vzdálenost světelných závor od nebezpečné zóny	62
Obr. 37	Zabezpečení – varianta B: laserový skener.....	63
Obr. 38	Snímaný prostor laserovým skenerem	64
Obr. 39	Rozdělení prostoru spolupráce na zóny	65
Obr. 40	Graf rizika pro jeho ohodnocení [13].....	67
Obr. 41	Ohodnocení rizika zakopnutí s následkem zlomení ruky	68

Seznam tabulek

Tab. 1	Základní parametry robotu Kuka KR10 R1100 sixx [1]	24
Tab. 2	Základní parametry kontroléru Kuka KR C4 compact [2]	24
Tab. 3	Obecné parametry řešení s taktilním senzorem	26
Tab. 4	Obecné parametry řešení se silo-momentovým senzorem	27
Tab. 5	Obecné parametry řešení s 1D laserovým senzorem	28
Tab. 6	Obecné parametry řešení s laserovým skenerem	29
Tab. 7	Definice kritérií	29
Tab. 8	Bodovací stupnice kritérií	30
Tab. 9	Významnost kritérií	30
Tab. 10	Hodnocení kritérií	30
Tab. 11	Porovnání párů dle autora práce	31
Tab. 12	Porovnání párů dle konzultanta práce	31
Tab. 13	Výsledné sumy vážených indexů dle autora práce	32
Tab. 14	Výsledné sumy vážených indexů dle konzultanta práce	32
Tab. 15	Technické parametry senzoru Keyence LK-G157 [3]	33
Tab. 16	Typové příkazy KRL pro pohyb zobrazené ve WorkVisual	45
Tab. 17	Ukázka deklarace a užití proměnné SIGNAL jako bitového výstupu	46
Tab. 18	Příklad užití funkce interrupt	46
Tab. 19	Příklad vytvoření bodu transformací souřadnic	47
Tab. 20	Výsledky měření cyklu A	48
Tab. 21	Výsledky měření cyklu B	48
Tab. 22	Parametry optických snímačů Keyence GL-RxxH [9]	60
Tab. 23	Parametry laserového skeneru Keyence SZ-04M [11]	63

Seznam použitých značek a symbolů

d	hustota sítě paprsků optického snímače [mm]
H	vzdálenost detekční roviny od podlahy [mm]
K	normou stanovený parametr pro rychlost přiblížení lidského těla [mm/s]
S	minimální bezpečná vzdálenost [mm]
T	doba doběhu [s]
t_1	čas mezi sepnutím snímače a nastavením výstupního signálu do polohy Off [ms]
t_2	čas mezi nastavením výstupního signálu snímače a zastavením nebezpečného stroje [ms]

Slovník zkratek

AI	Analog Input (Analogový vstup)
AO	Analog Output (Analogový výstup)
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
DI	Digital Input (Digitální vstup)
DO	Digital Output (Digitální výstup)
ERP	Enterprise Resource Planning
HW	Hardware
I/O	Input/Output (Vstup/výstup)
KRL	Kuka Robot Language
NI	National Instruments
PC	Počítač
PL	Performance Level (Úroveň vlastností)
PLC	Programmable Logic Controller
RTP	Robotizované technologické pracoviště
SAP	Systems, Applications & Products (Software pro řízení zdrojů, vrstva ERP)
SIL	Safety Integrity Level (Úroveň integrity)
SS	Souřadnicový systém
SW	Software
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
VN	Vysoké napětí

Úvod

Odštěpný závod Elektromotory Frenštát společnosti Siemens s. r. o. patří na trhu k předním producentům nízkonapěťových asynchronních motorů v osových výškách 225 až 355 mm, o výkonech 18,5 až 630 kW. V roce 2017 bylo v závodě vyrobeno 62 tisíc motorů, v následujících letech se počítá s více jak 30% růstem výroby.

V současné době je výroba povětšinou manuální či poloautomatická, především z důvodu rozmanité palety nabídky elektromotorů a možností jejich přizpůsobení, vždy dle potřeb pro maximální spokojenost zákazníka. Ročně je zpracováno kolem 12 tisíc nových konstrukčních variant jednotlivých typů motorů.

Z hlediska vývoje a udržení konkurenceschopnosti je nutné sledovat moderní trendy, ať už jde o Průmysl 4.0, aditivní výrobu, či jiné, a postupně tyto nové technologie implementovat do výrobního procesu. S tím souvisí i zadání této práce, tedy možné využití přesného robotického systému pro diagnostiku statorových svazků.

1 Analýza procesu diagnostiky statorových svazků

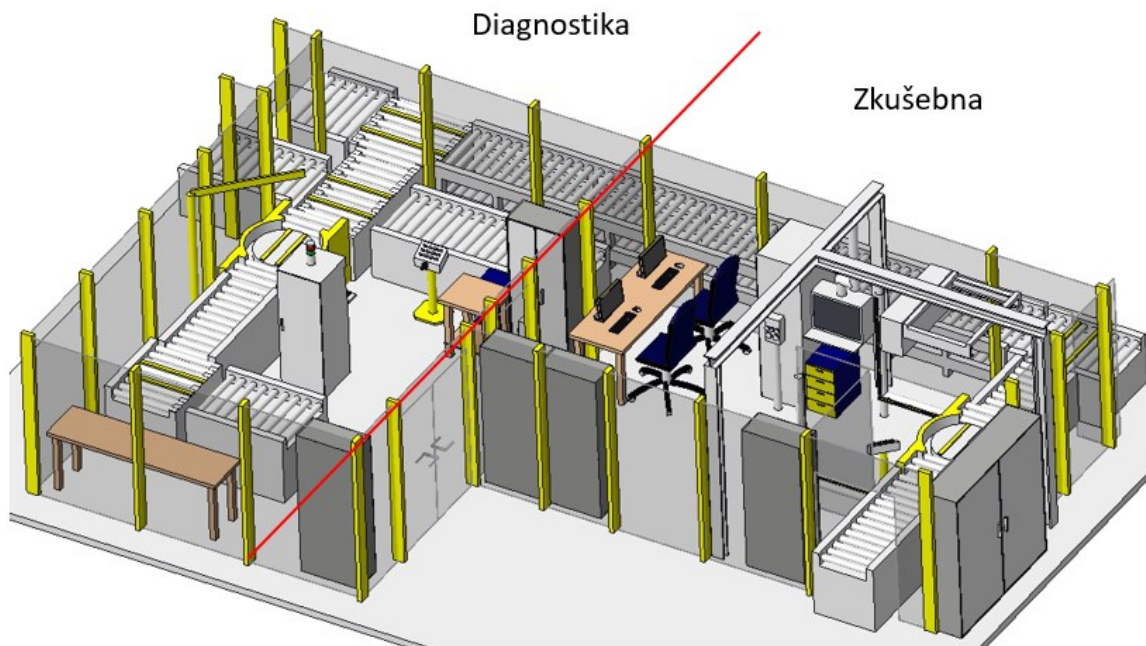
V průběhu výrobního cyklu elektromotorů dochází, z důvodu vysokých požadavků na kvalitu, ke kontrole jejich dílčích součástí. Jedna z kontrol se týká také statorů, kdy je nutné ověřit především správnost provedení a elektromagnetické parametry.

Každý statorový svazek je dopraven na zkušební stanoviště, kde se základními testy analyzují jeho vlastnosti. Pokud je zjištěna neshoda a stator v nějaké ze zkoušek vykáže nevyhovující výsledek, je předán na diagnostické stanoviště, kde se podrobněji pátrá po příčinách.



Obr. 1 Statorový svazek

V závodě je k dispozici dispoziční výkres továrny a jednotlivých pracovišť, nikoli však 3D model, ať už na jakékoli úrovni podrobnosti. Z tohoto důvodu byl v rámci práce vytvořen zjednodušený model analyzovaných pracovišť. Vizualizace je na Obr. 2. Jednotlivá pracoviště jsou popsána v dispozicích na Obr. 3 a Obr. 4.



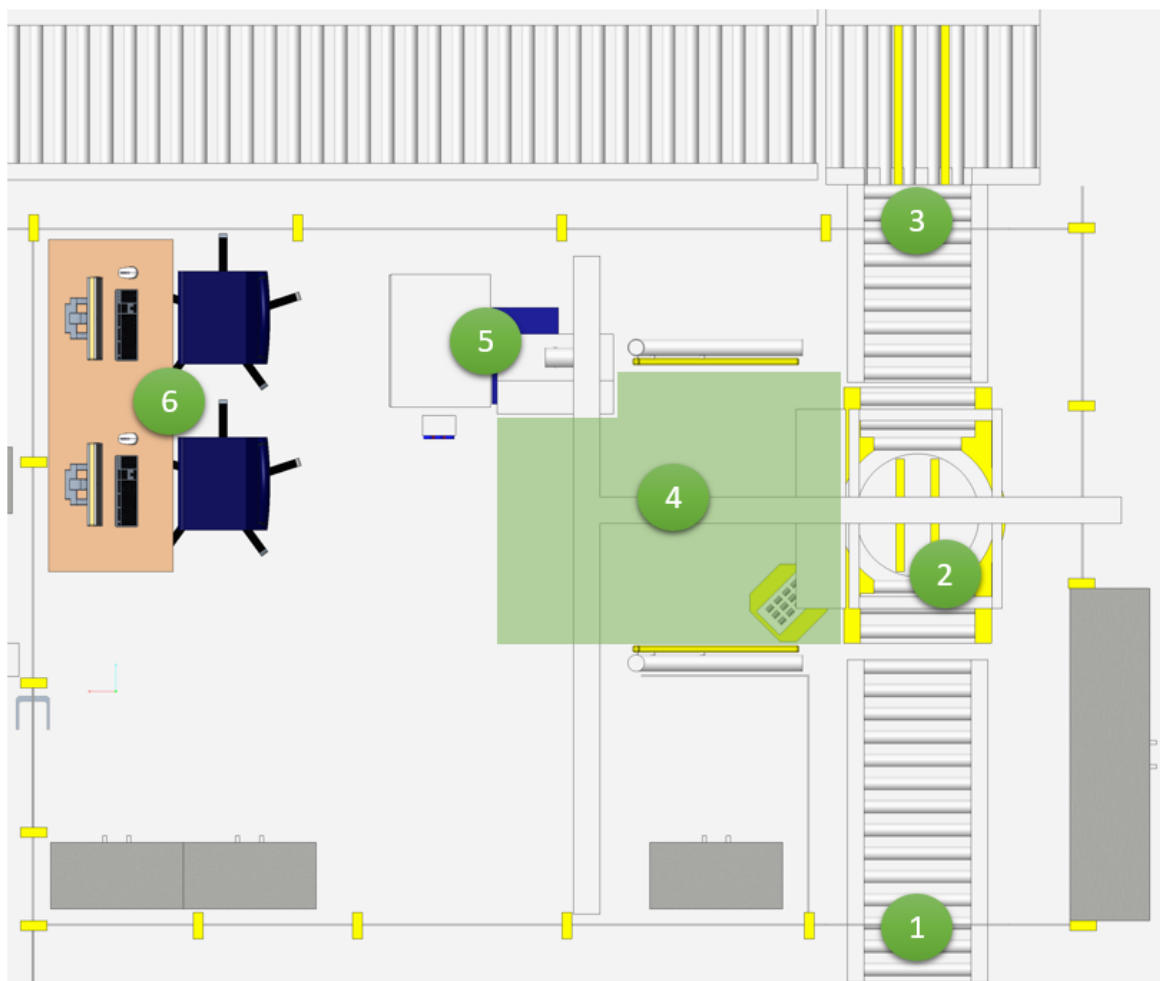
Obr. 2 Model zkušebny a diagnostického pracoviště

1.1 Zkušebna satorových svazků

Pracovní prostory diagnostického i zkušebního pracoviště jsou spolu svázaný a společně ohraničeny plotem. V prostoru zkušebního pracoviště mohou pracovat pouze osoby s odpovídající kvalifikací a školením, vstup je zabezpečen zámek. Ostatní osoby musí požádat o schválení vstupu a nemohou se uvnitř pohybovat bez dozoru.

Na Obr. 3 na další straně je vyobrazena zjednodušená dispozice zkušebny, číslice označují tyto pozice:

- 1 Vstupní dopravník satorových svazků
- 2 Otočný stůl, místo testování
- 3 Výstupní dopravník satorových svazků
- 4 Oblast, ve které se pohybuje zkušební technik při testování
- 5 Testovací stanice, vyhodnocovací monitor a jiné periferie
- 6 Počítačové stanice



Obr. 3 Dispozice zkušebny

Kontrola každého jednotlivého svazku trvá pracovníkům zkušebny 5 až 7 minut a je dodržován tento postup:

- Přijetí svazku – paleta se svazkem je přivolána pracovníkem na pozici pomocí ovladače (20 s),
- načtení údajů o svazku čtečkou čárových kódů do řídicí a vyhodnocovací jednotky (5 s),
- vizuální kontrola svazku a příprava k testu (100 s):
 - kontrola provedení vývodů,
 - kontrola (obšití) čel,
 - kontrola rozměrů, kontrola přesahů čel vinutí,
 - kontrola zapojení vodičů.
- Fyzické připojení kontaktních kleští k vodičům vinutí a přídatných prvků,
- spuštění testů na řídicí jednotce, jednotlivé testy (20 až 180 s):

...

...

Popis jednotlivých zkoušek jsou interní informace firmy Elektromotory Frenštát,
Siemens s. r. o.

...

...

...

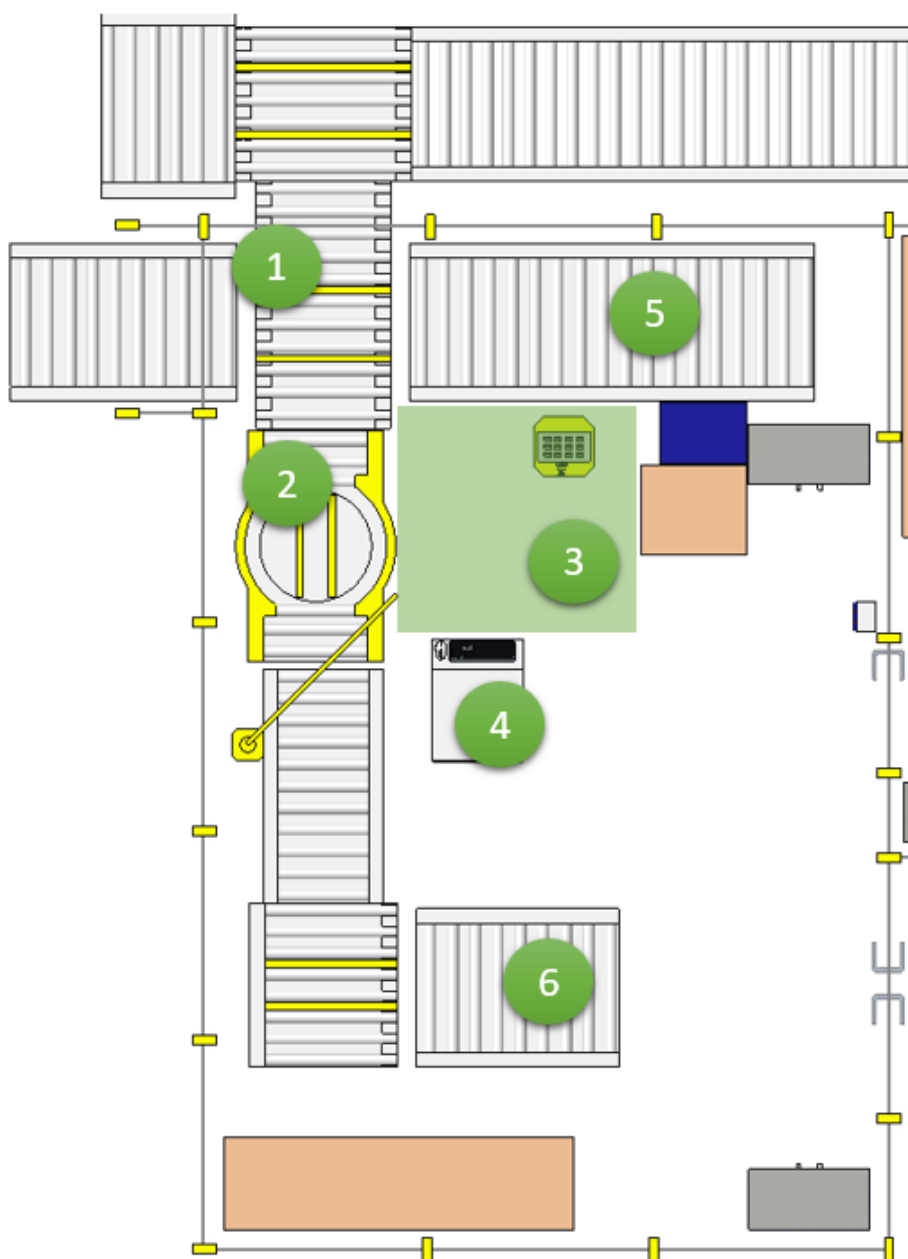
...

- Odpojení vodičů (20 s),
- nalepení kontrolní značky (15 s),
- vyhodnocení řídicí jednotkou a odeslání statorového svazku, pokud (20 s):
 - a) vyhovuje – odeslán na následující pracoviště,
 - b) nevyhovuje – pokračuje na diagnostické pracoviště.

* Více pólový svazek – změna zapojení a provedení vyznačených těchto zkoušek znovu.

1.2 Diagnostické pracoviště pro testy statorových svazků

Na tomto pracovišti lze uskutečnit další zkoušky ale také opakovat všechny, které byly provedeny na „běžné“ zkušebně. Užitím odlišné metodiky je možno díky testům získat detailnější výsledky, a lokalizovat tak konkrétní problémové místo. Operátor není limitován dobou, za kterou musí chybu odhalit – naopak odhalení problému, jeho oprava zde na diagnostickém stanovišti nebo případné vrácení statorového svazku na jedno z předchozích stanovišť je zde stěžejním úkolem.



Obr. 4 Dispozice diagnostického pracoviště

Na Obr. 4 je vyobrazen zjednodušený dispoziční diagram diagnostického pracoviště, čísla označují tyto pozice:

- 1 Vstupní/výstupní dopravníky statorových svazků
- 2 Otočný stůl, místo testování
- 3 Oblast, ve které se pohybuje operátor při testování
- 4 Testovací stanice, vyhodnocovací monitor a jiné periferie
- 5 Odkládací dopravník
- 6 Výstupní dopravník



Obr. 5 Diagnostické pracoviště

Většina ze jmenovaných testů statorových svazků probíhá v poloautomatickém režimu v režii testovací stanice. Zkoušky, při kterých je nutná činnost operátora, a které by případně mohl vykonávat či asistovat u nich robot, jsou test rotace pole, test rozprostření magnetického pole, zkouška rázovou vlnou a VN test vinutí.

...

...

...

Popis jednotlivých zkoušek jsou interní informace firmy Elektromotory Frenštát,
Siemens s. r. o.

...

...

...

...

Všechny výše popsané testy jsou vysoce závislé na preciznosti provedení úkonu operátorem. Nevhodnou manipulací či nepozorností může docházet ke zkreslení výsledků, ať už nedůkladným přiložením senzoru při měření rotace pole či rozprostření pole, anebo nepovšimnutí si vad akustickým poslechem při zkouškách VN a rázovou vlnou, u kterých se mimo jiné vyskytuje i riziko úrazu elektrickým proudem.

1.3 Systémová komunikace a řízení na pracovištích

Pro správu výrobních zakázek, čtení výrobní dokumentace a dalších technických dat je použit ERP systém firmy SAP SE. Komunikace probíhá pomocí protokolu TCP/IP.

Pracovníci na zkušebně a diagnostice užitím čtečky čárových kódů (každé zakázce je přiřazen jedinečný kód) načítají do testovacích stanic data potřebná pro provedení operace kontroly. Stanice si tak jsou schopny načíst potřebná data z ERP a provést s asistencí operátora zkoušku.

Testovací stanice jsou postaveny na architektuře měřících karet společnosti National Instruments, řízení probíhá pomocí PLC a PC.

Operátoři si mohou vyhledat také podrobná data o statorech, doplnit informace k zakázce apod. pomocí přítomných počítačů, které slouží jako ERP terminály.

Dopravníky jsou řízeny operátory poloautomaticky na lokální úrovni dle jejich potřeby. Na obou pracovištích se nachází ovladač, samotné válečkové dopravníky jsou vybaveny jednoduchými optickými senzory, které kontrolují možnost přesunu palet se statory na požadovaná místa.

Pomocí ovladače pro dopravníky je možné také regulovat výšku otočného stolu, a to v rozmezí 60 až 115 mm.

1.4 Požadavky zadavatele

Cílem práce je navrhnout technický systém s využitím robotu umožňující nalezení středové osy statorového svazku v prostoru. K návrhu je nutné přistupovat s ohledem na budoucí přípravou využití automatizované diagnostiky statorových svazků nahrazující manuální pohyby během práce spojené s rizikem úrazu elektrickým proudem při kontaktu se živými částmi. Cílem není tvorba metodik a postupů pro realizaci vlastních testů.

K návrhu je požadováno využít robot Kuka KR 10 R1100 sixx, který je v závodě k dispozici pro testovací aplikace v kombinaci s řídicí skříní Kuka KR C4 v provedení compact.

Statory se na zkušebně i diagnostickém pracovišti pohybují na paletách na válečkovém dopravníku. Na pracovišti se vyskytují dva podobné typy palet – jeden z nich obsahuje překlopný opěrný mechanismus pro uložení hranatých statorových svazků (Obr. 6 vpravo), kdy svazek plní i funkci kostry. Čtvercové statorové svazky jsou vyráběny poměrově v mnohem menším množství, než běžný typ svazků kulatého tvaru (paleta na Obr. 6 vlevo).

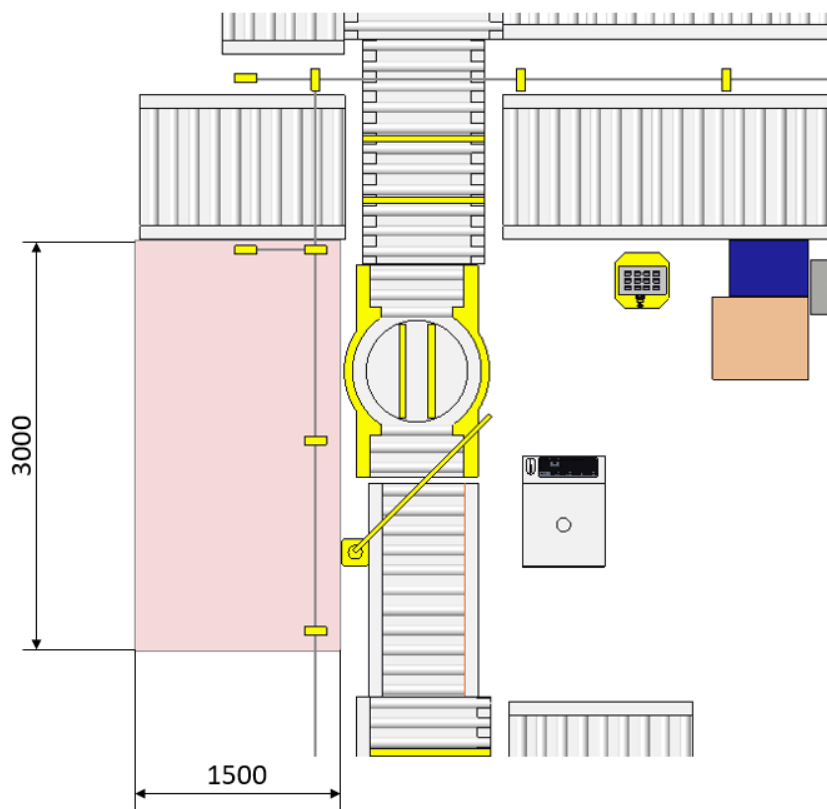


Obr. 6 Palety pro statorové svazky

Přibližná poloha stejně jako rámcové rozměry svazku je díky načtení dat z ERP (přes TCP/IP) pomocí čárového kódu systému vždy známá. Nejmenší vnitřní průměr statorů z vyráběných typů je 230 mm, nejvyšší vnější průměr svazků je 550 mm.

Osu statoru je potřebné nalézt s přesností do 0,1 mm. Samotná operace zjišťování geometrie svazku, tj. nalezení středové osy statoru, by neměla trvat déle než 3 minuty. Je preferována identifikace geometrie za užití bezkontaktních senzorů.

Na Obr. 7 jsou vyobrazeny maximální zástavbové rozměry robotické buňky, jedná se o oblast těsně doléhající na okolní funkční prvky diagnostického pracoviště o rozměrech 1500 x 3000 mm.



Obr. 7 Maximální zástavbové rozměry

1.4.1 Průmyslový robot Kuka KR10 R1100 sixx

Pro testovací účely je v závodě k dispozici angulární robot firmy Kuka, který svými parametry splňuje základní předpoklady pro nasazení v uvažované aplikaci.



Obr. 8 Robot Kuka KR 10 R1100 sixx [1]

Tab. 1 Základní parametry robotu Kuka KR10 R1100 sixx [1]

Parametr	Hodnota
Počet stupňů volnosti	6
Nosnost	10 kg
Dosah	1101 mm
Opakovatelná přesnost	$\pm 0,03$ mm
Hmotnost	54 kg

1.4.2 Kontrolér Kuka KR C4 compact

Robot je řízen pomocí kontroléru KR C4 compact, tedy zmenšené verze standardního KR C4.



Obr. 9 Kontrolér Kuka KR C4 compact [2]

Tab. 2 Základní parametry kontroléru Kuka KR C4 compact [2]

Parametr	Hodnota
Rozměry	271 x 483 x 460 mm
Pracovní napětí	230 V
Stupeň	IP20
Pracovní teplota	5 až 45 °C
Hmotnost	33 kg

2 Senzorický subsystém pro detekci geometrie svazku

Na základě požadavků zadavatele bylo nutné provést rešerši senzorických systémů vhodných pro řešení aplikace, tedy dostatečně přesné nalezení středu statoru (polohu podélné osy) po jeho přijetí na dopravníku. Jakmile robot určí polohu statoru, může přejít k vlastní diagnostice.

Robotickému systému bude znám typ motoru, tedy jeho teoretické ideální rozměry a také přibližná poloha na dopravníku.

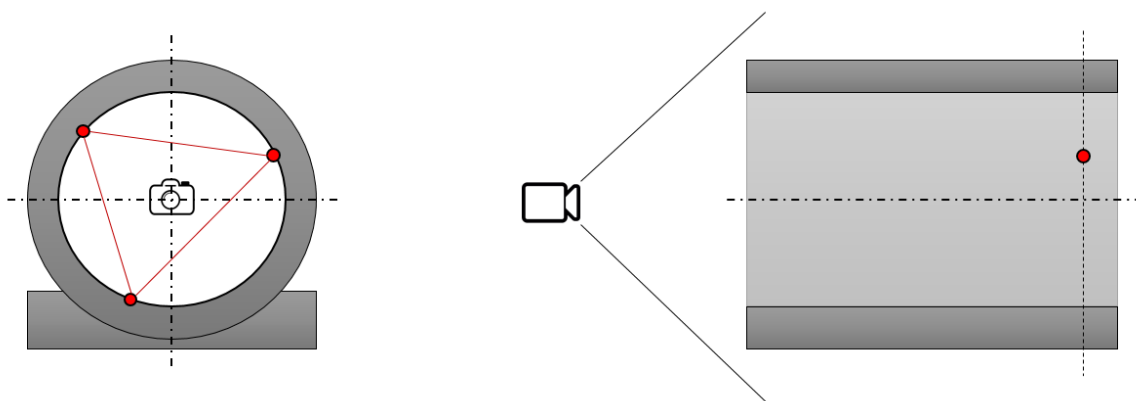
2.1 Dostupné typy senzorů

Pro zjištění středu oválné součásti lze standardně využít několik principů a metodik na trhu dostupných. Jedná se především o taktilní snímače, silo-momentové senzory, laserové senzory a skenery.

2.1.1 Taktilní snímač

Výrobci senzorů jsou často pro podobný druh operací doporučovány dotekové snímače, kterými lze sepnutím při doteku se statorem definovat určitý počet bodů a pomocí jejich souřadnic následně střed vypočítat.

Výhodou řešení je jednoduchost provedení na robotu. Nevýhodou poté komplikovanost při detekci statoru na dopravníku v kombinaci s kamerou, celková rychlost operace a také malé množství získaných bodů, ze kterých by byl střed definován. Je nutné také počítat se zubovým provedením vnitřního obvodu svazků, kudy vede vinutí, a také skutečností, že ani vnější plocha obvodu není pravidelná (výskyt čel vinutí, drážek, sražení).



Obr. 10 Schéma principu rozpoznání statoru na páse

Ze schématu na Obr. 10 je patrné, že kamera nejprve zachytí přibližnou polohu statoru na páse a robot poté najíždí do vnitřního prostoru, kde postupnými doteky vyhledá minimálně tři náhodné body, pomocí kterých je možné na základě kosinové věty dopočítat střed kružnice opsané, tj. polohu osy statoru.

Tab. 3 Obecné parametry řešení s taktilním senzorem

Parametr	Hodnota
Odhad nákladů řešení	30 000 Kč
Přídavné zařízení	Ano, pravděpodobně kamera
Vyhodnocování	Digitální vstupy/výstupy; pomalé s min. 3 doteky
Přesnost	až 0,2 mm
Konstrukce	Přípravek pro senzor, dotyková plocha nesmí sklouznout do zubů; nutný kontakt

2.1.2 Silo-momentový senzor

Další možností je využití silo-momentového senzoru. Systém by pracoval na velmi podobném principu jako taktilní snímač, nicméně lze počítat s vyšší přesností a také jednodušším provedením přípravku pro kontakt (nikoli taktilním spínačem). Během několika doteků by se opět zaznamenala poloha robotu, z čehož lze vypočítat polohu středové osy.

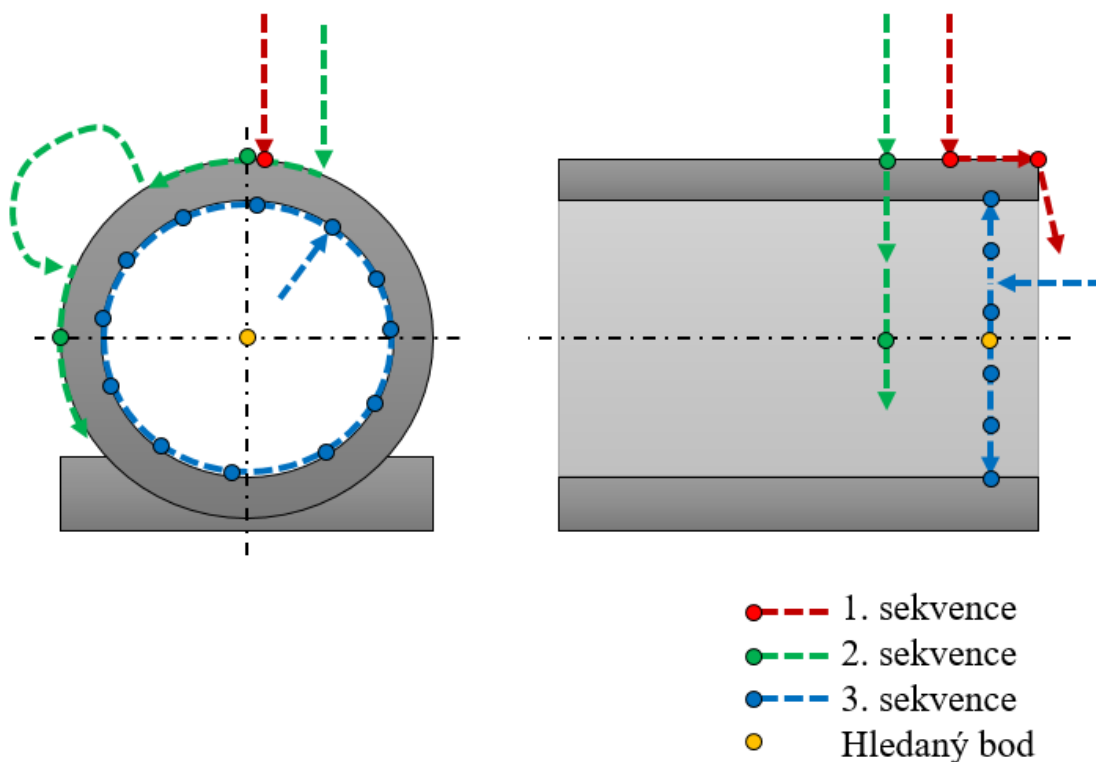
Tab. 4 Obecné parametry řešení se silo-momentovým senzorem

Parametr	Hodnota
Odhad nákladů řešení	150 000 Kč
Přídavné zařízení	Ano, pravděpodobně kamera
Vyhodnocování	Digitální vstupy/výstupy; pomalé s min. 3 doteky
Přesnost	až 0,1 mm
Konstrukce	Přípravek pro senzor; dotyková plocha nesmí sklouznout do zubů; nutný kontakt

2.1.3 Laserový senzor vzdálenosti

Z bezdotykových metod měření lze uvažovat o laserových paprscích, které se sebou přinášejí vysokou přesnost. Při umístění na přírubu robotu by bylo nutné provádět kalibraci pro zajištění přesného výpočtu polohy statoru na základě umístění senzoru na přírubě (pomocí přípravku). Potíží by také mohlo být odladění vyhodnocovací aplikace.

Měření by bylo nutné provádět ve třech hlavních sekvencích – identifikace statoru na páse, určení přibližné polohy středu a přesné určení středové osy.



Obr. 11 Schéma sekvencí pro laserový senzor

Na schématu Obr. 11 jsou vyznačeny jednotlivé sekvence. V první sekvenci je nutné najít stator umístěný na dopravníku postupným přibližováním shora. Následně se hledá hrana statoru.

Ve druhé sekvenci dochází k nepřesnému (vlivem nerovnosti vnějších ploch svazku) určení středu nalezením vrchlíků válcových ploch. Průsečík jimi vedených přímek, kolmými k osám souřadnicového systému, je přibližný hledaný bod, tj. bod ležící na ose statoru. Ve třetí sekvenci, kdy dochází k odměřování zajištění robotu dovnitř statoru, je možné z této velké množiny bodů určit přesně hledaný bod.

V případě užití laserového senzoru vzdálenosti je nutné počítat s přítomností kalibračního přípravku na pracovišti. Kalibrací by byly omezeny negativní účinky vnitřního systému robotu (př. vůle) a okolí jako například změna teploty, neplánovaný kontakt robotu s jiným prvkem či údržbou během i mimo provoz apod.

Tab. 5 Obecné parametry řešení s 1D laserovým senzorem

Parametr	Hodnota
Odhad nákladů řešení	200 000 Kč
Přídavné zařízení	Ne
Vyhodnocování	Nutný nad systém zpracovávající data; pomalá rychlost prvotní identifikace statoru na páse
Přesnost	až 0,01 mm
Konstrukce	Jednoduchý přípravek

2.1.4 Laserový 2D/3D skener

Nejrychlejším řešením by bylo užití laserového skeneru, který by byl po zběžném skenu okolí a určení přibližné polohy statoru robotem na okamžik dovnitř statoru zasunut a definoval by tak veškeré rozměry. Zároveň by mohl provést i celkovou kontrolu geometrie statorového svazku.

Odladění takového měření a správné vyhodnocení by nicméně bylo z principu fungování tohoto typu senzorů komplikovanější a datově náročnější.

Tab. 6 Obecné parametry řešení s laserovým skenerem

Parametr	Hodnota
Odhad nákladů řešení	400 000 Kč
Přídavné zařízení	Ne
Vyhodnocování	Nutný nad systém zpracovávající data; složité odladění; vysoká rychlost
Přesnost	až 0,05 mm
Konstrukce	Přípravek

2.2 Vícekriteriální analýza

Výběr optimální metodiky a s tím souvisejícího senzorického subsystému pro identifikaci geometrie statorového svazku v prostoru byla vypracována vícekriteriální analýza nabízených variant.

2.2.1 Kritéria hodnocení

Tab. 7 Definice kritérií

	Kritérium	Popis kritéria
K1	Přesnost	Díky tohoto principu snímání je možné nalézt osu statoru s velkou přesností
K2	Jednoduchost vyhodnocování	Průběh získání dat, komunikace s řídicím systémem a výpočet středu osy
K3	Pořizovací náklady	Cena kompletního senzorického subsystému
K4	Přítomnost přídavných senzorů	Nutnost užití dalších komponent, např. senzor pro nalezení statoru po příjezdu na pásu
K5	Jednoduchost konstrukce	Složitost montáže senzoru na přírubu robotu, zajištění funkčnosti, tuhosti
K6	Rychlost vyhodnocení	Čas potřebný pro snímání a vyhodnocení
K7	Bezkontaktnost	Výskyt kontaktu s povrchem statoru

2.2.2 Hodnocení úrovní a váhy významnosti

Tab. 8 Bodovací stupnice kritérií

Úroveň	Hodnota
Vysoká	6
Dobrá	5
Průměrná	4
Nízká	3
Nevyhovující	2
Nepříznivý stav	1

Tab. 9 Významnost kritérií

Váha významnosti	Hodnota
Nejvyšší	2
Nejnižší	1

2.2.3 Hodnocení jednotlivých kritérií

Tab. 10 Hodnocení kritérií

	Taktilní snímač		Silo-momentový senzor		Laserový senzor vzdálenosti		Laserový skener	
K1	Málo přesný	2	Méně přesný	3	Velmi přesný	6	Přesný	4
K2	Jednoduché	5	Jednoduché	5	Složité	2	Složité	2
K3	Levné	6	Drahé	3	Drahé	3	Velmi drahé	2
K4	Ano	1	Ano	1	Ne	5	Ne	5
K5	Složité	2	Jednoduché	5	Jednoduché	5	Složité	2
K6	Mírně rychlý	4	Rychlý	5	Pomalý	2	Velmi rychlý	6
K7	Kontaktní	1	Kontaktní	1	Bezkontaktní	5	Bezkontaktní	5

2.2.4 Určení významnosti kritérií

Pro určení významnosti byla užita metoda porovnání v trojúhelníku párů. Porovnání bylo provedeno autorem práce a také konzultantem práce, jakožto odborníkem v dané problematice.

Tab. 11 Porovnání párů dle autora práce

Porovnané páry kritérií						Počet voleb	Váha významnosti
K1	K1	K1	K1	K1	K1	3	1,6
K2	K3	K4	K5	K6	K7		
	K2	K2	K2	K2	K2	2	1,4
	K3	K4	K5	K6	K7		
		K3	K3	K3	K3	2,5	1,5
		K4	K5	K6	K7		
			K4	K4	K4	3,5	1,7
			K5	K6	K7		
				K5	K5	5	2,0
				K6	K7		
					K6	0,5	1,1
					K7	5	2,0

Tab. 12 Porovnání párů dle konzultanta práce

Porovnané páry kritérií						Počet voleb	Váha významnosti
K1	K1	K1	K1	K1	K1	3	1,6
K2	K3	K4	K5	K6	K7		
	K2	K2	K2	K2	K2	2,5	1,5
	K3	K4	K5	K6	K7		
		K3	K3	K3	K3	2	1,4
		K4	K5	K6	K7		
			K4	K4	K4	1	1,2
			K5	K6	K7		
				K5	K5	5	2,0
				K6	K7		
					K6	2,5	1,5
					K7	5	2,0

2.2.5 Sumy vážených indexů kritérií a optimální varianta

Na základě součinu váhy významnosti a bodového ohodnocení každého kritéria vzniká vážený index. Součet vážených indexů je výsledným bodovým ohodnocením varianty. Optimální varianta je ta s nejvyšším ziskem při součtu vážených indexů.

Tab. 13 Výsledné sumy vážených indexů dle autora práce

K	Váha významnosti	Taktilní snímač		Silo-moment. senzor		Laserový senzor		Laserový skener	
		Body	Vážený index	Body	Vážený index	Body	Vážený index	Body	Vážený index
K1	1,6	2	3,2	3	4,8	6	9,6	4	6,4
K2	1,4	5	7,0	5	7,0	2	2,8	2	2,8
K3	1,5	6	9,0	3	4,5	3	4,5	2	3,0
K4	1,7	1	1,7	1	1,7	5	8,5	5	8,5
K5	2,0	2	4,0	5	10,0	5	10,0	2	4,0
K6	1,1	4	4,4	5	5,5	2	2,2	6	6,6
K7	2,0	1	2,0	1	2,0	5	10,0	5	10,0
Součet			29,3		33,5		37,6		31,3

Tab. 14 Výsledné sumy vážených indexů dle konzultanta práce

K	Váha významnosti	Taktilní snímač		Silo-moment. senzor		Laserový senzor		Laserový skener	
		Body	Vážený index	Body	Vážený index	Body	Vážený index	Body	Vážený index
K1	1,6	2	3,2	3	4,8	6	9,6	4	6,4
K2	1,5	5	7,5	5	7,5	2	3,0	2	3,0
K3	1,4	6	8,4	3	4,2	3	4,2	2	2,8
K4	1,2	1	1,2	1	1,2	5	6,0	5	6,0
K5	2,0	2	4,0	5	10,0	5	10,0	2	4,0
K6	1,5	4	6,0	5	7,5	2	3,0	6	9,0
K7	2,0	1	2,0	1	2,0	5	10,0	5	10,0
Součet			30,3		35,5		35,8		31,2

2.3 Závěrečné doporučení – senzor Keyence

Z tabulek Tab. 13 a Tab. 14 z předchozí podkapitoly vyplývá, že se autor práce i konzultant shodli na optimálním řešení v podobě laserového senzoru vzdálenosti.

Z následného průzkumu trhu lze doporučit ke koupi senzor zavedeného dodavatele, tj. firmy Keyence, konkrétně typ LK-G157 [3] s měřicím rozsahem 150 ± 40 mm. Jedná se o velmi přesný laser bezpečnostní třídy II, což umožňuje bez větších komplikací případné nasazení takového senzoru v továrně.



Obr. 12 Senzor vzdálenosti Keyence LK-G157 [3]

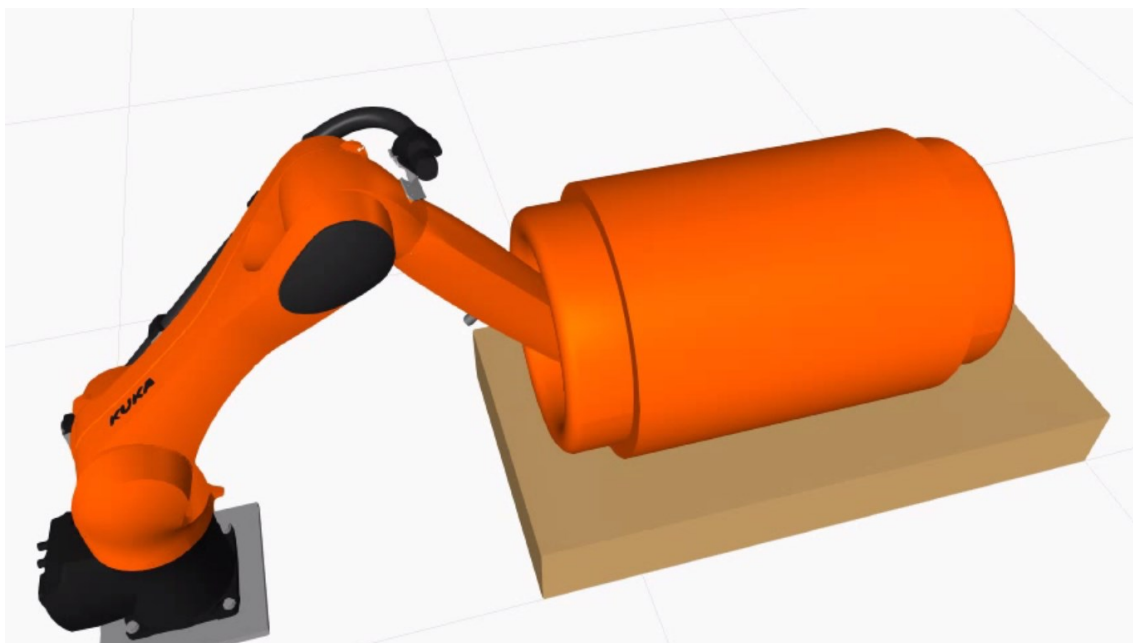
Tab. 15 Technické parametry senzoru Keyence LK-G157 [3]

Parametr	Hodnota
Měřicí rozsah	110 až 190 mm
Typ paprsku	Červený 650 nm (viditelný)
Třída laseru	II
Přesnost	$\pm 0,075$ mm
Opakovatelnost	0,5 μ m
Frekvence snímání	20 až 1000 μ s
Stupeň krytí	IP67

3 Návrh testovací aplikace

Jelikož robot zná jen přibližnou polohu statoru na dopravníku, je nutné, aby použitím senzoriky definoval jeho absolutní pozici v prostoru. V kapitole 0 bylo doporučeno řešení v podobě užití laserového senzoru vzdálenosti.

Tato kapitola popisuje návrh a základní metodiku pro skenování a hledání statoru v prostoru užitím zakoupeného senzoru od firmy Keyence. Oddělení digitalizace, závodu ve Frenštátě, má k dispozici testovací místnost s instalovaným robotem Kuka KR10 R1100 sixx.



Obr. 13 Zjednodušený model statoru a robotu provádějícího inspekci

3.1 Požadavkový list pro testovací pracoviště

Na základě analytické části práce (kapitoly 1 a 0), byl vypracován požadavkový list pro testovací pracoviště.

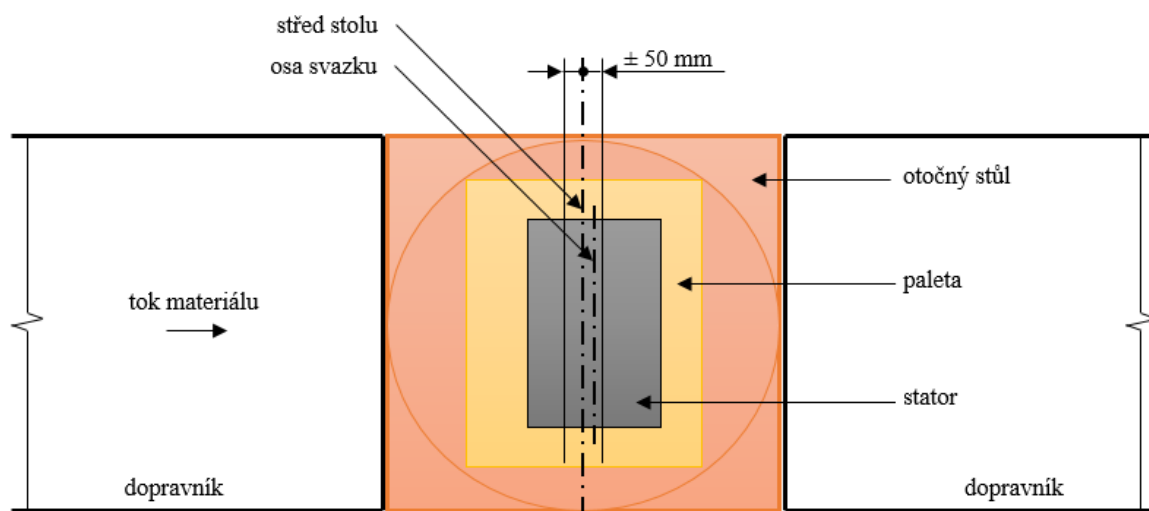
- Navrhněte, simulujte a otestujte metodiku pro identifikaci geometrie statorového svazku v prostoru,
- k simulaci využijte software Kuka.Sim Pro,

- k praktickým zkouškám využijte v závodě testovací místnost s instalovaným robotem Kuka KR10,
- testy realizujte se zakoupeným a namontovaným laserovým senzorem Keyence, nicméně plně funkční vyhodnocování měření nemusí být součástí testů a komunikaci s nadřazeným řídicím systémem, poskytujícím data ze skenování, lze simulovat na základě rámcových rozměrů svazku,
- navrhnete přípravek pro uchycení senzoru,
- testujte s reálným svazkem plechů kruhového tvaru,
- procedura (nalezení středu) by měla trvat maximálně 3 minuty,
- na základě simulace analyzujte možný dosah robotu vzhledem ke tvaru vyráběných svazků, určete tak optimální umístění pro RTP.

3.2 Popis aplikace

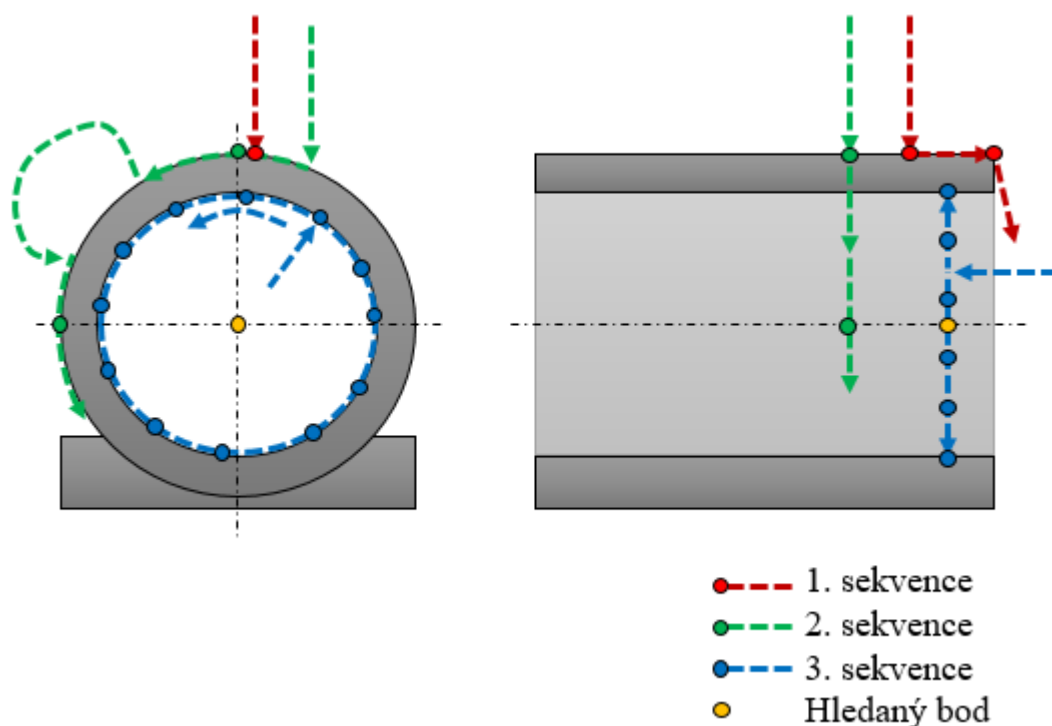
Z výrobního procesu jsou k dispozici informace, o jaký typ (osovou výšku, rámcové rozměry) kontrolovaného statoru se jedná.

Pomocí otočného stolu, na kterém se stator s paletou po příjezdu po dopravníku nachází, lze měnit výšku objektů v rozsahu od 600 do 1 150 (zdvih 550 mm), což může pomoci prodloužit dosah robotu v rámci systému. Palety zajišťují, že se osa statoru nachází v rovnoběžné pozici vzhledem k osám válečků dopravníku. Poloha palety se statorem je v rozmezí ± 50 mm vzhledem k ose dopravníku, jak je zobrazeno na Obr. 14.



Obr. 14 Schéma umístění statoru na otočeném stole

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.3, navrhovaný proces identifikace geometrie v prostoru se skládá ze tří hlavních sekvencí.



Obr. 15 Schéma sekvencí

V první fázi robot z výchozí pozice přejíždí do bezpečné vzdálenosti nad stator, laserový paprsek míří kolmo dolů. Následně dochází k přibližování sensorové hlavy k povrchu statoru až do chvíle, kdy je vzdálenost rovna 150 mm. Dalším krokem je pohyb a odměřování ve směru osy statoru, kdy je hledána hrana svazku.

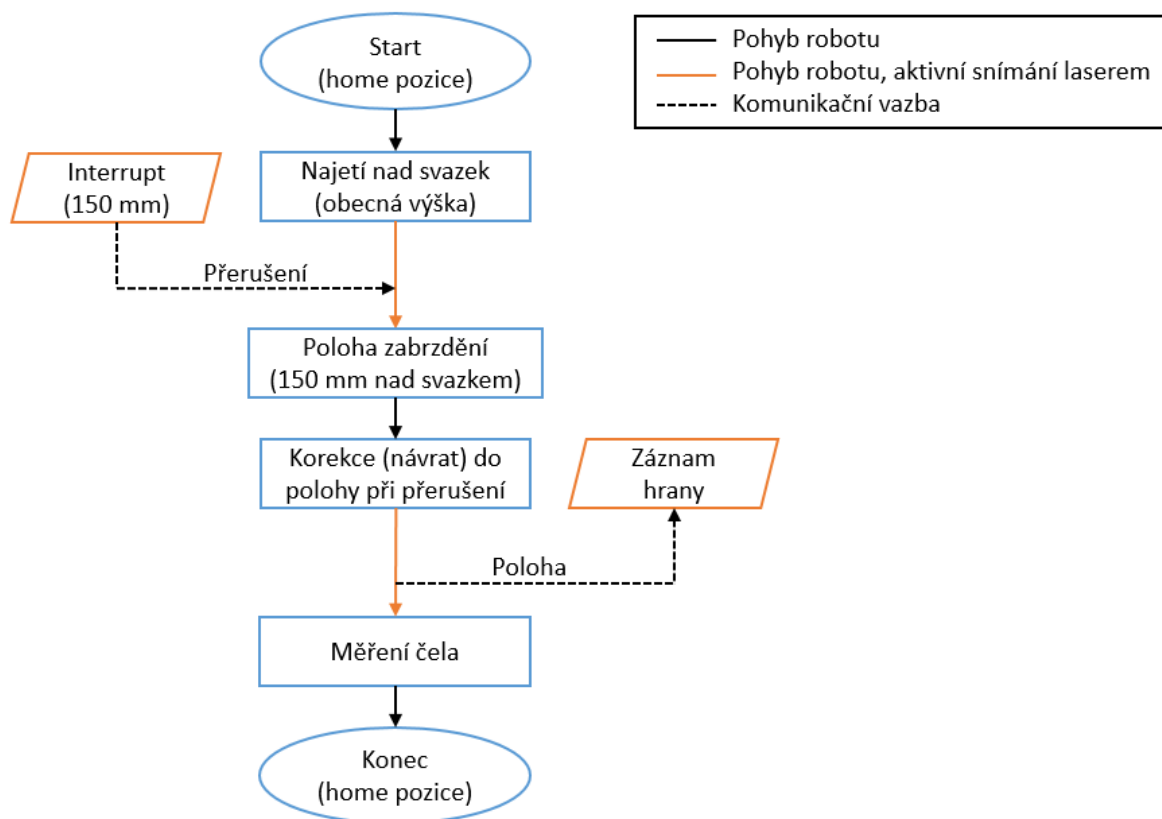
Druhá sekvence spočívá v hledání dvou vrchlíků (lokálních maxim) na vnější válcovité části statoru. Pomocí těchto bodů a jimi vedenými přímkami rovnoběžnými se souřadnicovým systémem lze stanovit přibližný střed v řádech milimetrů, což je dostačující pro bezpečné přesunutí hlavy do středu svazku.

Pro určení přesného středu slouží třetí sekvence, kdy dochází k měření vnitřního prostoru svazku. V současném návrhu je počítáno se skenem pouze v jedné rovině v pevné hloubce 50 mm od hrany svazku plechů, do budoucna lze uvažovat o možném skenu ve více místech a kontrolovat tak geometrii svazků.

3.2.1 Diagramy algoritmu

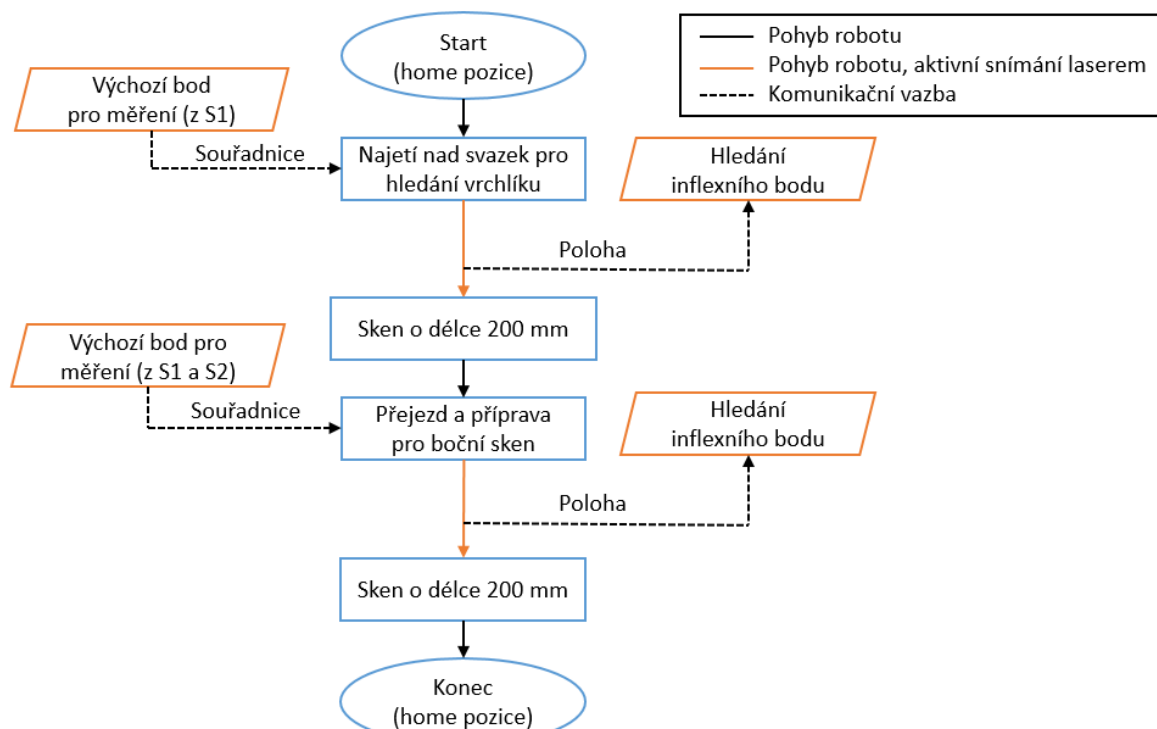
V kapitole 3.2 byla popsána metodika zjišťování geometrie statoru v prostoru. Na základě toho vznikl algoritmus kroků potřebných pro pohyb robotu. Algoritmy byly připraveny pro válcový typ statorového svazku.

V první sekvenci robot přejíždí nad svazek do obecné (univerzální) výšky nad očekávanou polohu osy svazku. Poté se pohybuje směrem dolů ke svazku, ve vzdálenosti 150 mm zastaví a následuje pohyb podél osy, přičemž je skenováno čelo (hledán konec svazku). Důležité je pro tento krok svázat aktuální polohu robotu se záznamem hrany svazku.



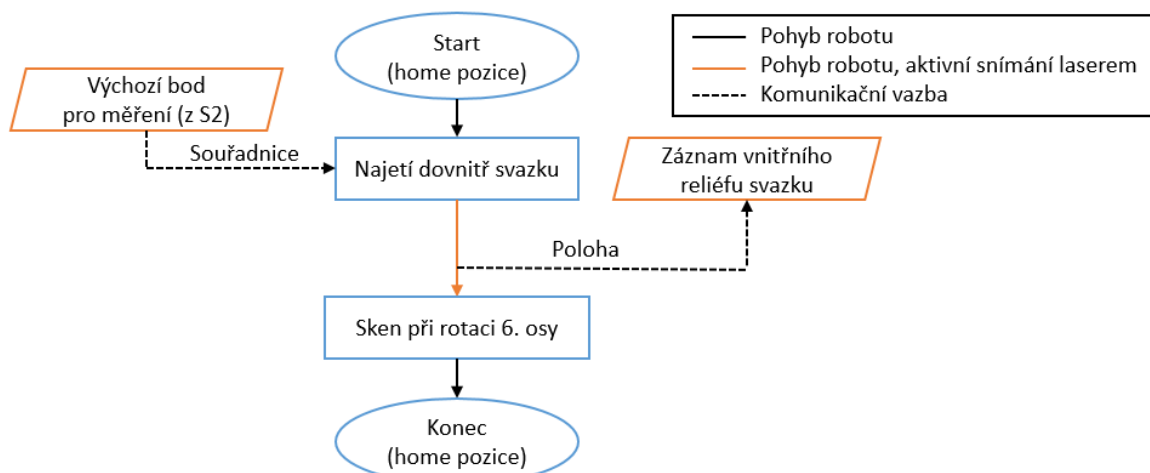
Obr. 16 Algoritmus 1. sekvence

Ve druhé sekvenci jsou robotu předány souřadnice výchozího bodu pro sken (vypočítáno na základě dat ze sekvence 1 – na základě výšky a polohy čela svazku). Robot tak může provést měření po přímce kolmé na osu statoru, a zaznamenat tak vrchlík (bod zvratu horního zaoblení svazku). Obdobně je poté proveden sken zaoblení bočního. Opět je nutné svázat aktuální polohu robotu s vrchlíkem křivek.



Obr. 17 Algoritmus 2. sekvence

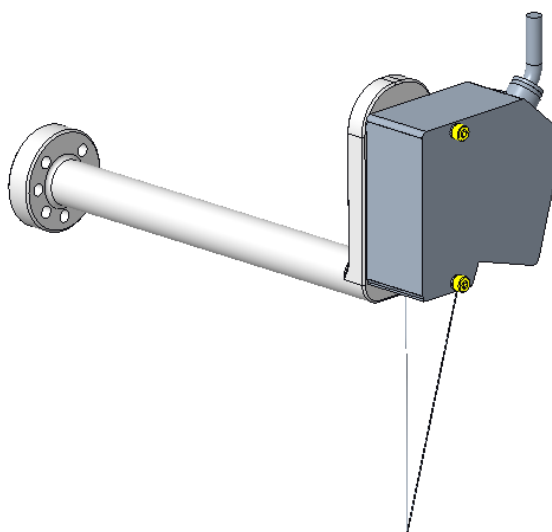
Třetí sekvence probíhá v návaznosti na výsledky měřených dat polohy osy z druhé sekvence. Robot zajíždí do bodu blízkému se ose statorového svazku, kde provádí sken vnitřního průměru.



Obr. 18 Algoritmus 3. sekvence

3.3 Oddálení senzoru

Na Obr. 13 na straně 34 lze vidět, že robot bude mít zvláště u satorů menších průměrů problém najet se senzorem dovnitř satoru a provést potřebná měření k nalezení středu (osy) satoru. Z tohoto důvodu je nutné přikročit k návrhu prodloužené příruby robotu, prozatím pro testovací aplikaci bez přímé možnosti uchycení senzoriky. Na Obr. 19 je vyobrazen návrh přípravku, jeho funkční délka (vzdálenost krytu senzoru od příruby robotu) je 200 mm.

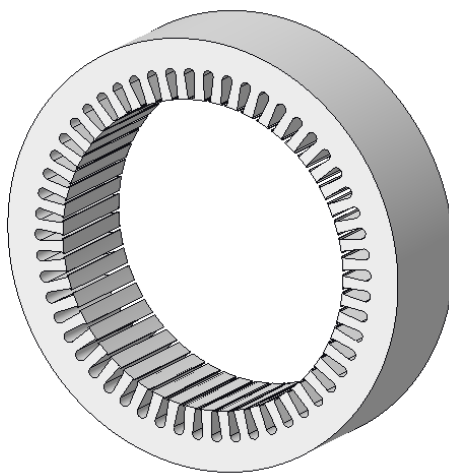


Obr. 19 Model přípravku pro oddálení senzoru od příruby robotu

Přípravek byl vyroben ze dvou kusů kovových materiálů – hřídele a desky pro uchycení senzoru. Kabeláž senzoru je přichycena fixačními páskami. Reálná podoba je viditelná na Obr. 21.

3.4 Testovací svazek plechů

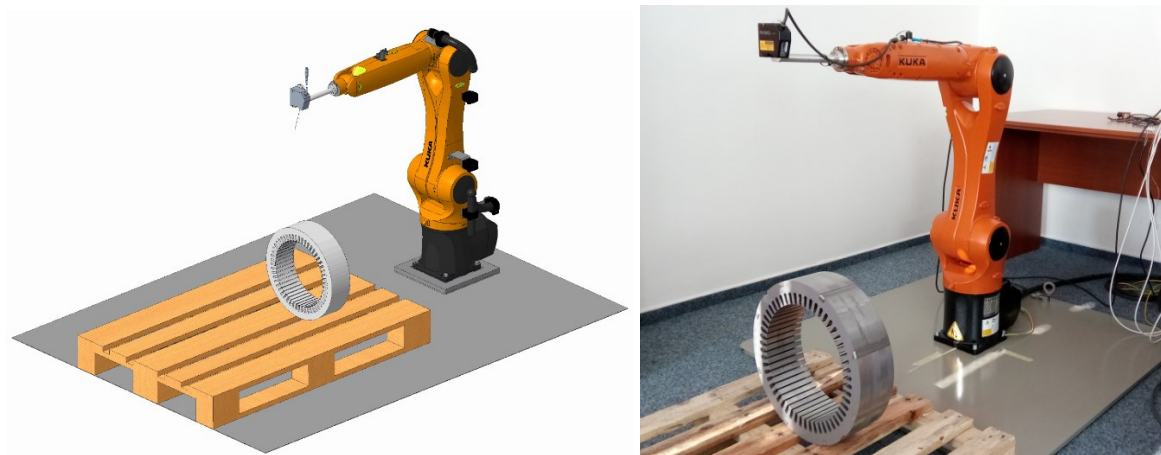
Z výroby byl dodán vzorek satorového svazku, sestaveného z menšího množství plechů, který byl dostatečný pro testovací aplikaci. Vnější průměr svazku je 390 mm, vnitřní 280 mm a délka 100 mm.



Obr. 20 Testovací svazek plechů

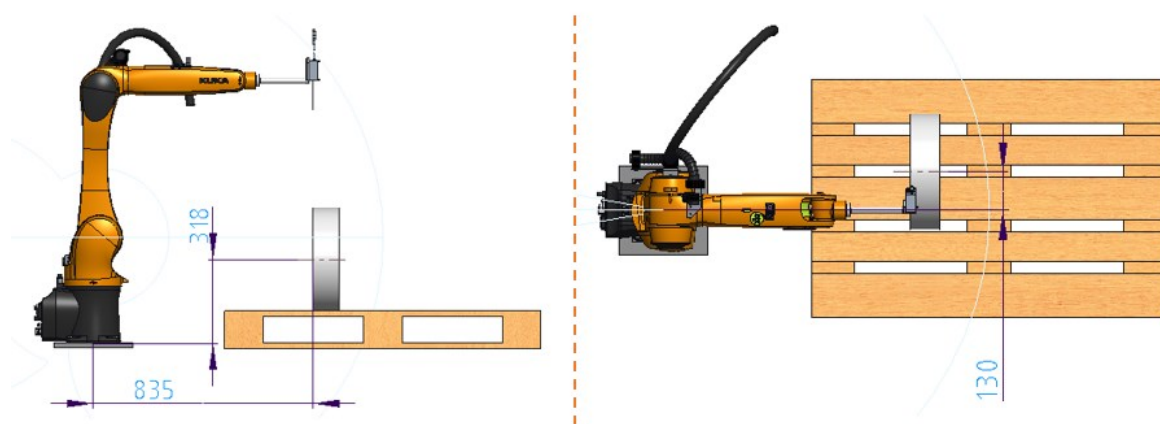
3.5 Návrhový model rozmístění prvků testovacího pracoviště

Pro prvotní testy bylo zvoleno jednoduché umístění svazku plechů na paletě v dosahu robotu. Vytvořené modely byly v následující kapitole použity pro simulaci v softwaru Kuka.Sim Pro.



Obr. 21 Srovnání modelu s pozdějším reálným uspořádáním

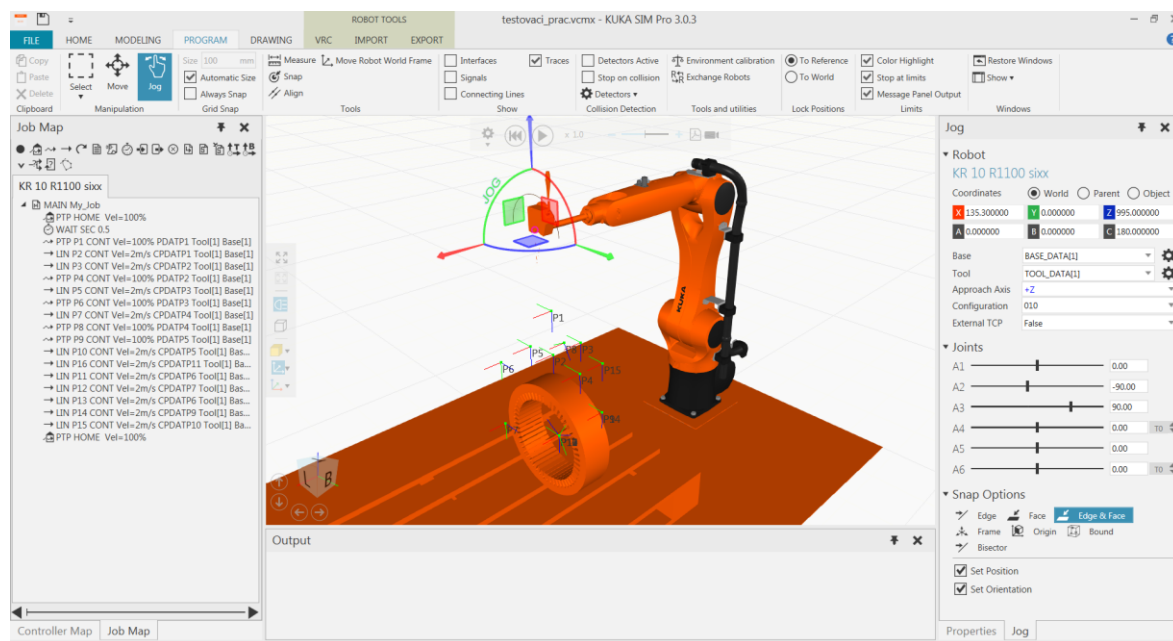
V reálném návrhu je kalkulováno s umístěním robotu v jiné výškové hladině, což pozitivně ovlivní dosah hlavy a sníží riziko kolize ramene s tělesem svazku.



Obr. 22 Vzdálenosti počátku SS robotu od testovacího svazku

4 Simulace a praktický test

V závodě je k dispozici licence softwaru Kuka.Sim Pro ve verzi 3.0. Jedná se o pokročilý nástroj pro simulaci úkonů s roboty Kuka přímo od dodavatele. V rámci této práce byl systém použit především k vizualizaci činností robotu, ověření dosahů a správné metodiky přístupu k problému.



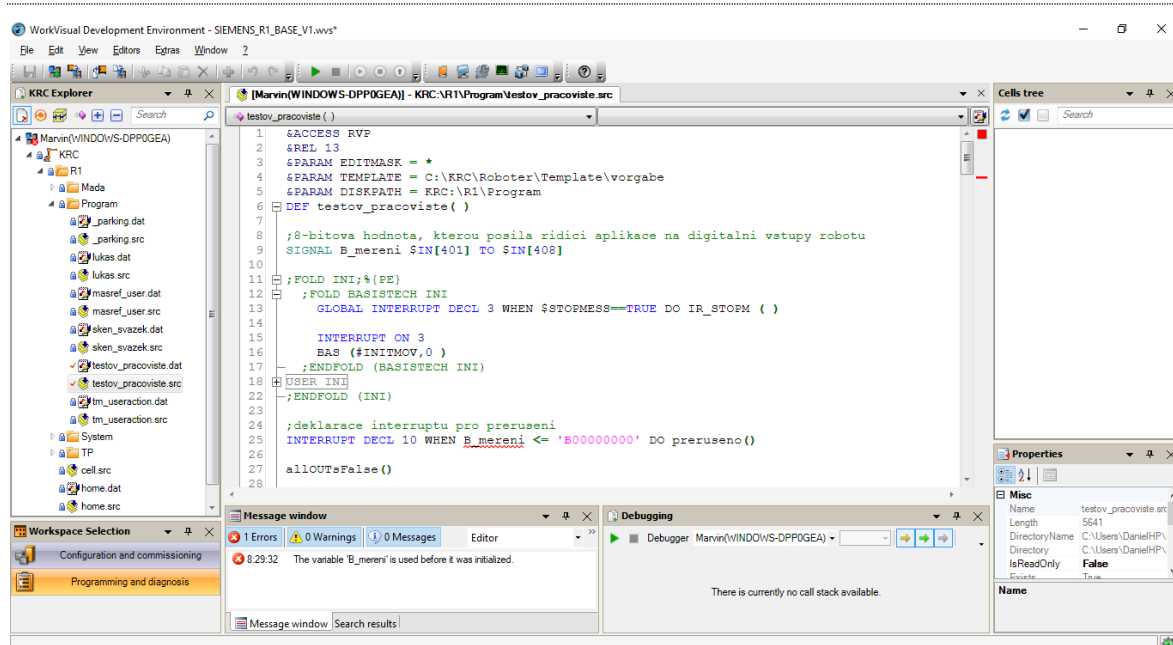
Obr. 23 Prostředí Kuka.Sim Pro 3.0

Simulováno bylo testovací pracoviště navržené v kapitole 3. Následně došlo ke srovnání výsledků s praktickým testem, jehož řídicí program je popsán v kapitole 4.1.

4.1 Řídicí systém testovací aplikace

Pro reálnou aplikaci na testovacím pracovišti byl navržen řídicí systém zajišťující pohyb robotu i přenos zpětné vazby ze senzoru.

Pohyb robotu je řízen kontrolérem. Jednotlivé úkony byly programovány v software WorkVisual 4.0, který je ke každému robotu dodáván jako součást základního balíčku. Tento software slouží jak k programování, tak i ke konfiguraci nastavení kontroléru, správě projektů, instalaci přídatných balíčků atd.

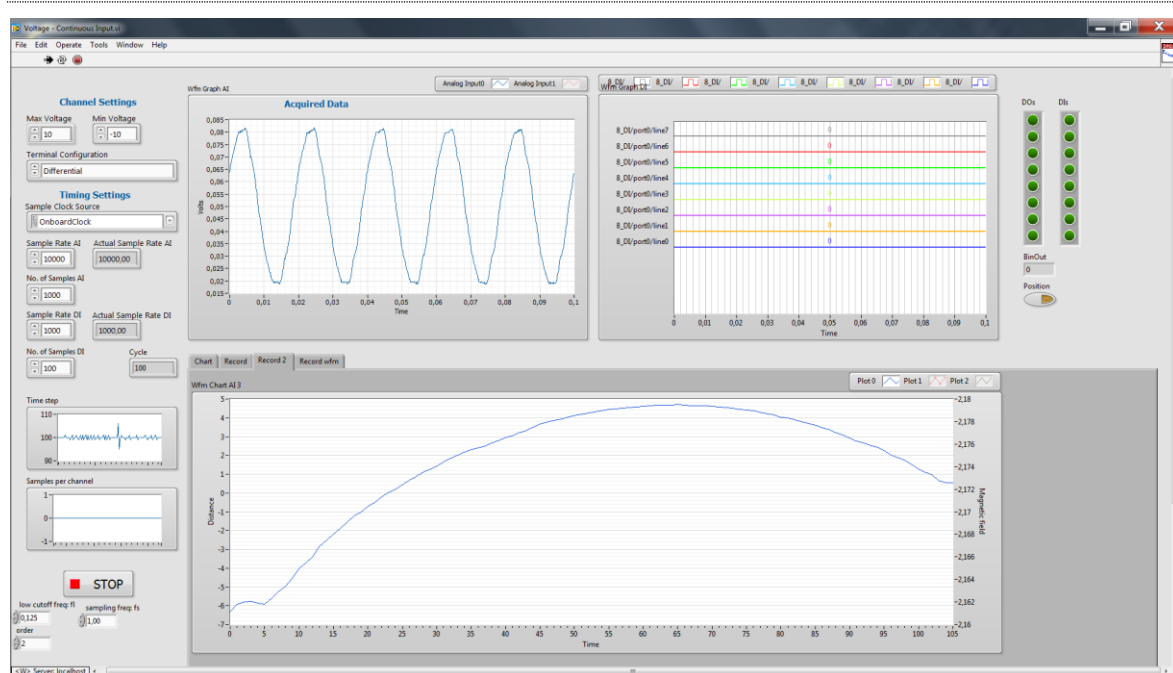


Obr. 24 Pracovní prostředí WorkVisual 4.0

Zpětná vazba ze senzoru (jeho řídicí karty) je do robotu zavedena pomocí digitálního I/O modulu s 8 vstupy a 8 výstupy, kterou obsahuje řídicí skříň robotu. Pro zápis a čtení dat řídicí aplikace slouží karty od firmy National Instruments [4]. Ty jsou umístěny v doku NI compactDAQ 9189. Použitými kartami jsou:

- Karta NI 9223 (AI ± 10 V) – čtení hodnoty ze senzoru,
- karta NI 9421 (DI 24 V) – čtení DO z robotu,
- karta NI 9472 (DO 24 V) – zápis DI do robotu, tj. vzdálenost ze senzoru.

Komunikaci mezi periferiemi na bázi protokolu TCP/IP zajišťuje síťový switch. Výsledky měření jsou také vyobrazeny na dotykovém panelovém PC firmy Siemens, vyhodnocovací aplikace byla naprogramována v LabVIEW™. Na Obr. 25 je aplikace vyobrazena. Ve spodní části je možné si všimnout grafu s výsledky záznamu měření při hledání vrchlíku.



Obr. 25 Testovací aplikace pro ověření funkce

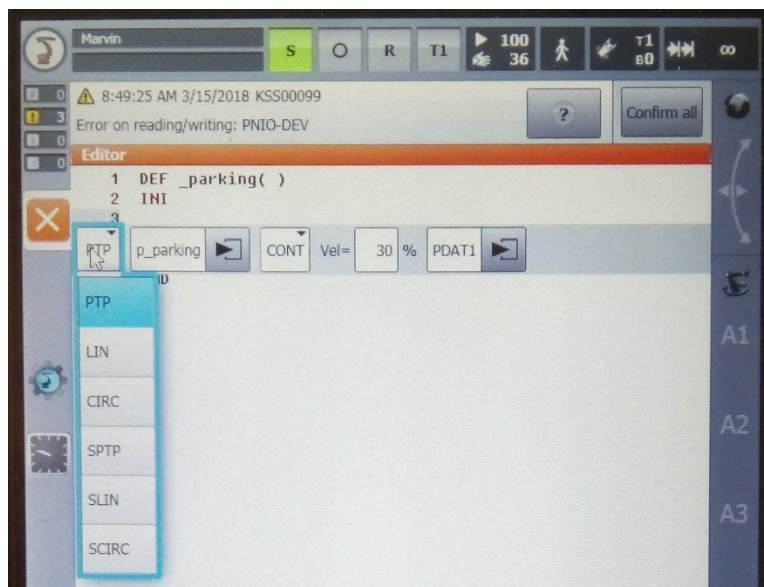
Zjednodušené schéma zapojení jednotlivých prvků testovací aplikace je přiloženo jako příloha B na konci tohoto dokumentu a v digitální podobě na CD nosiči.

Všechny periferie popsané v této kapitole jsou v závodě k dispozici pro testovací aplikace. Řídicí systém testovací aplikace a vyhodnocovací program v LabVIEW™ nebyly navrženy a programovány autorem práce, ale odbornými zaměstnanci závodu. Autor práce programoval řídicí aplikaci robotu Kuka v jazyce KRL.

4.1.1 Program KRL

Roboty Kuka jsou programovány v jazyce KRL – Kuka Robot Language. Syntax se ze známých jazyků podobá Pascalu. Každý KRL program se skládá ze svou souborů s příponami *.dat* (definice datových konstant) a *.src* (příkazy pro pohyb robotu).

V řídicí aplikaci byly užity typové příkazy pro pohyb robotu. V ovládacím panelu robotu se příkazy zobrazují ve zjednodušené podobě a nastavování jednotlivých parametrů probíhá volbou v grafické podobě, naopak v prostředí WorkVisual lze programování lépe uzpůsobit konkrétním potřebám.



Obr. 26 Programování pohybu robotu Kuka na ovládacím panelu

Tab. 16 Typové příkazy KRL pro pohyb zobrazené ve WorkVisual

<pre> ;pohyb PTP - z výchozího bodu do cílového po optimální trajektorii ;komentář, sloužící pro zjednodušené zobrazení voleb na ovládacím panelu ;FOLD PTP P2 Vel=80 % PDAT7 Tool[1]:laser Base[0];%{PE}%R 8.3.44,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P2, 3:, 5:80, 7:PDAT7 \$BWDSTART=FALSE ;nastavení kompatibility se starší verzí PDAT_ACT=PPDAT7 ;odkaz na souřadnice definovaného cílového bodu v souboru .dat FDAT_ACT=FP2 ;odkaz na definovaný nástroj v souboru .dat BAS(#PTP_PARAMS,80) ;nastavení rychlosti PTP XP2 ;příkaz pro zahájení pohybu ;ENDFOLD zabalení PTP příkazu ;obdobně lze zadat lineární pohyb, záměnou PTP za LIN </pre>
<pre> ;pohyb lze zadat i relativně BAS(#VEL_CP, 0.01) ;nastavení rychlosti LIN_REL {X -100} ;příkaz pro zahájení pohybu -100 mm v ose X </pre>
<pre> ;definice výstupu \$OUT[401] = FALSE </pre>

Programovací jazyk KRL umožňuje definovat mimo jiné datový typ SIGNAL a zapisovat do něj data v binární podobě. Toto řešení bylo využito při zavedení zpětné vazby senzoru vzdálenosti, kdy byl měřitelný rozsah 110 až 190 mm škálován na osmibitovou hodnotu (decimálně -127 až 128), přičemž:

- 110 mm = -127
- 150 mm = 0
- 190 mm = 128

Signál ze senzoru tak byl díky řídicí aplikaci přiveden na osm digitálních vstupů robotu.

Tab. 17 Ukázka deklarace a užití proměnné SIGNAL jako bitového výstupu

```
;deklarace
SIGNAL B_mereni $OUT[401] TO $OUT[408]

;bitový zápis čísla 13 uložen do proměnné B_mereni
B_mereni = 'B00001101'
```

Další užitou funkcí byl interrupt – přerušení, čímž bylo dosaženo zastavení robotu, když se z obecné bezpečné vzdálenosti nad svazkem robot k němu po vertikální ose přibližuje, přičemž nezná jeho velikost.

Tab. 18 Příklad užití funkce interrupt

```
;deklarace přerušení: pokud je signál z měření, tj. snímaná vzdálenost menší
nebo rovna bitové nule (rovno 150 mm), vykonaj funkci preruseno
INTERRUPT DECL 10 WHEN B_mereni <= 'B00000000' DO preruseno()

;aktivace přerušení
INTERRUPT ON 10

;definice funkce preruseno
DEF preruseno()
    BRAKE ;zastavení pohybu robotu
    INTERRUPT OFF 10 ;deaktivace přerušení
    LIN $POS_INT ;návrat do polohy, při které došlo k přerušení
    RESUME ;pokračovat v programu příkazem následujícím po tom, při kterém bylo
    přerušení vyvoláno
END
```

Velmi užitečným nástrojem je také transformace souřadnic, pomocí níž lze vytvořit nový souřadný systém převzetím a úpravou souřadnic jakéhokoli souřadného systému již definovaného.

Tab. 19 Příklad vytvoření bodu transformací souřadnic

```
;deklarace bodu A
DECL E6POS A

;$POS_ACT - aktuální pozice, : - dvojtečka je transformační operátor
;Bod A je roven souřadnicím zděděným z aktuální pozice a posunutý o -100 mm
v ose X a o 100 mm v ose Z
A = $POS_ACT : {x -100, y 0, z 100, a 0, b 0, c 0}

;Pohyb do bodu A po lineární dráze
LIN A
```

4.2 Výsledky simulace a praktického testu

Na základě poznatků ze simulace a praktického testu bylo dosaženo závěru, že navrhovaný koncept a metodika pro nalezení středové osy statorového svazku jsou proveditelné, prvotní výsledky měření odpovídají očekávaným hodnotám a požadavky na systém specifikované v kapitole 3.1 byly splněny. Na dalším vyhodnocování měření je tak možné pokračovat v interní režii specializovaných zaměstnanců závodu ve Frenštátu. Lze také přistoupit k dalšímu bodu, tj. návrhu úpravy diagnostického pracoviště do podoby RTP.

Kompletní program testovací aplikace v jazyce KRL, popsané v kapitole 4.1.1, je obsažen v digitální podobě na CD nosiči jako příloha C.

Simulační soubor VCMX z programu Kuka.Sim Pro s testovací úlohou je k práci přiložen na CD nosiči jako příloha D.

Video testovací úlohy ze simulace z programu Kuka.Sim Pro je k práci přiloženo na CD nosiči jako příloha E.

4.2.1 Analýza naměřených dat

Data získána z měření laserovým snímačem Keyence byla v průběhu testů zaznamenána aplikací naprogramovanou v LabVIEWTM zaměstnanci podniku. Pro ověření opakovatelnosti a přesnosti byla provedena následující analýza.

Bylo realizováno pět po sobě jdoucích nezávislých měření, kdy nebylo manipulováno s paletou ani statorem. Souřadnice středu kružnice (statorového svazku) byly vypočteny v osách Y a Z souřadného systému báze robotu. Následně byl také vypočítán průměr svazku. Výsledky cyklu A jsou zaznačeny v Tab. 20.

Tab. 20 Výsledky měření cyklu A

Měření [-]	Poloha v ose Y [mm]	Poloha v ose Z [mm]	Průměr [mm]
A.1	-11,52	313,74	140,00
A.2	-11,52	313,79	139,98
A.3	-11,51	313,72	140,01
A.4	-11,54	313,71	140,00
A.5	-11,57	313,75	140,00
Směrodatná odchylka [mm]	$-11,532 \pm 0,024$	$313,742 \pm 0,031$	$139,998 \pm 0,011$
Opakovatelnost [mm]	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$

Po prvním měření (cyklus A) bylo s paletou a svazkem lehce manipulováno, poté byl test proveden znovu. Výsledky druhého cyklu (B) měření jsou v Tab. 21.

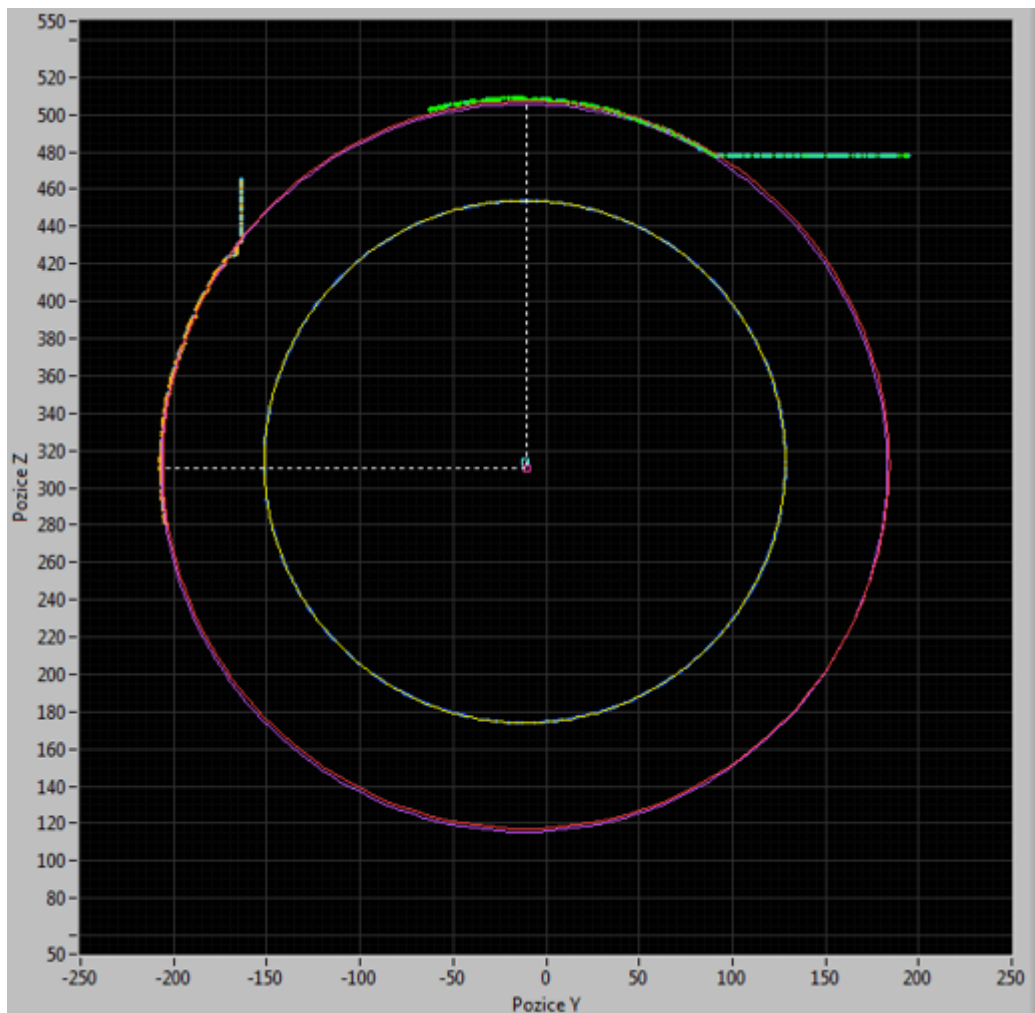
Tab. 21 Výsledky měření cyklu B

Měření [-]	Poloha v ose Y [mm]	Poloha v ose Z [mm]	Průměr [mm]
B.1	-11,53	313,88	140,02
B.2	-11,51	313,82	140,01
B.3	-11,47	313,78	140,01
B.4	-11,47	313,81	140,01
B.5	-11,49	313,84	140,00
Směrodatná odchylka [mm]	$-11,494 \pm 0,026$	$313,826 \pm 0,037$	$140,01 \pm 0,013$
Opakovatelnost [mm]	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$

Dle výsledných dat je patrné, že se při zkouškách pohybovala opakovatelná přesnost celého systému do $\pm 0,05$ mm. Čas potřebný k nalezení středu statorového svazku je roven hodnotě 65 sekund.

Na Obr. 27 je na další straně vyobrazen vyhodnocovací graf z LabVIEW™ aplikace. Zelená a oranžová značí snímání senzorem, z tohoto záznamu je vypočtena a vykreslena

růžová kružnice, tj. vnější průměr svazku. Menší žlutozelená kružnice znázorňuje vnitřní průměr, který je získán na základě skenu uvnitř svazku. Na obrázku je také viditelná korekce středu po skenu vnitřní části svazku (růžový bod – přibližný odhad středu na základě vnějšího skenu, žlutozelený bod – korekce po vnitřním skenu).



Obr. 27 Záznam měření v aplikaci

5 Návrh RTP v rámci diagnostického pracoviště

Přestože ještě není kompletně vyřešena a otestována metodika pro diagnostiku statorových svazků robotem, kterýžto úkol bude řešen odborníky na sensoriku týmu digitalizace závodu ve Frenštátu, zadavatel práce požaduje provedení návrhu úpravy pracoviště diagnostiky se zabudovaným robotem.

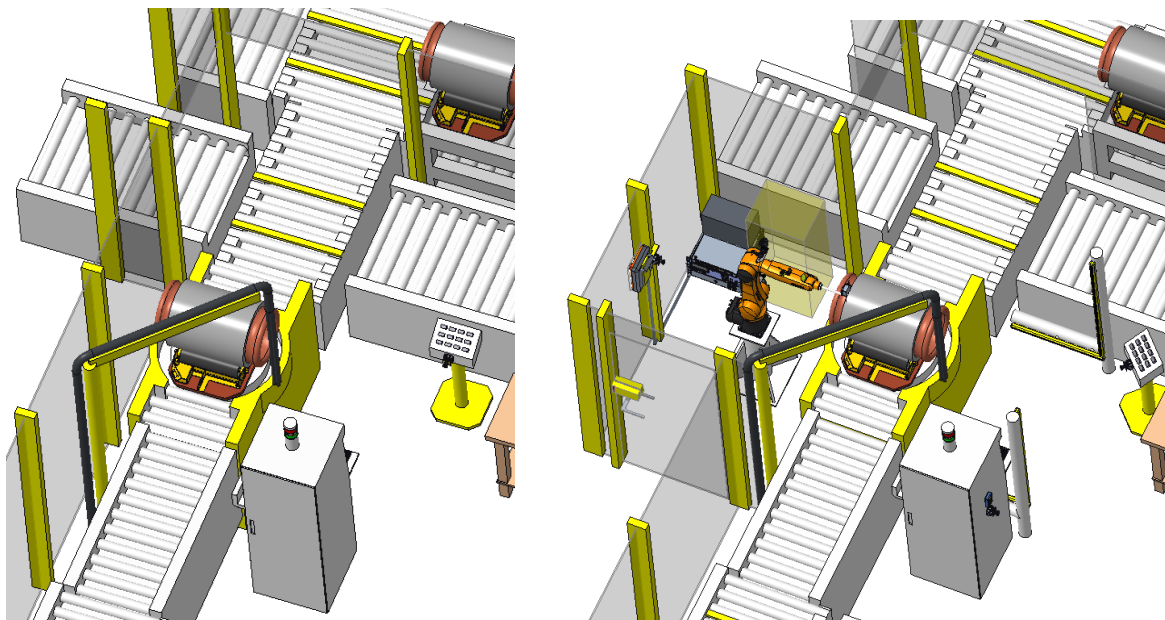
5.1 Požadavkový list pro RTP

Na základě všech předchozích kapitol zabývajících se analýzou současného řešení a testováním možného provedení byl sestaven požadavkový list pro robotizované technologické pracoviště diagnostiky statorových svazků.

- Navrhněte úpravu pracoviště diagnostiky statorových svazků v závodě ve Frenštátu,
- navrhněte dispozici pracoviště s robotem Kuka KR10, kontrolérem a dalšími nutnými technologickými, řídicími a bezpečnostními prvky,
- nepřekročte zástavbové rozměry 1500 x 3000 mm pro možné rozšíření pracoviště (Obr. 7, strana 23),
- operátor bude pověřen kontrolou statorového svazku, zapojením vodičů statoru k testovací stanici a poté opuštěním pracoviště, aby mohl robot vykonat svou úlohu,
- navrhněte způsob řízení a komunikace v rámci pracoviště, případně i komunikaci s řídicím systémem továrny a zakázek,
- vymezte místo na přípravek pro kalibraci přesnosti snímače Keyence. Přípravek může být potřebnou součástí aplikace na základě dat získaných v pozdějším průběhu testování,
- zajistěte bezpečnost navrženého pracoviště a vypracujte analýzu rizik dle platných norem.

5.2 Návrh úpravy diagnostického pracoviště

V této podkapitole jsou popsány navrhované úpravy pro robotizaci diagnostického pracoviště. Na Obr. 28 je patrná změna oproti původní podobě.

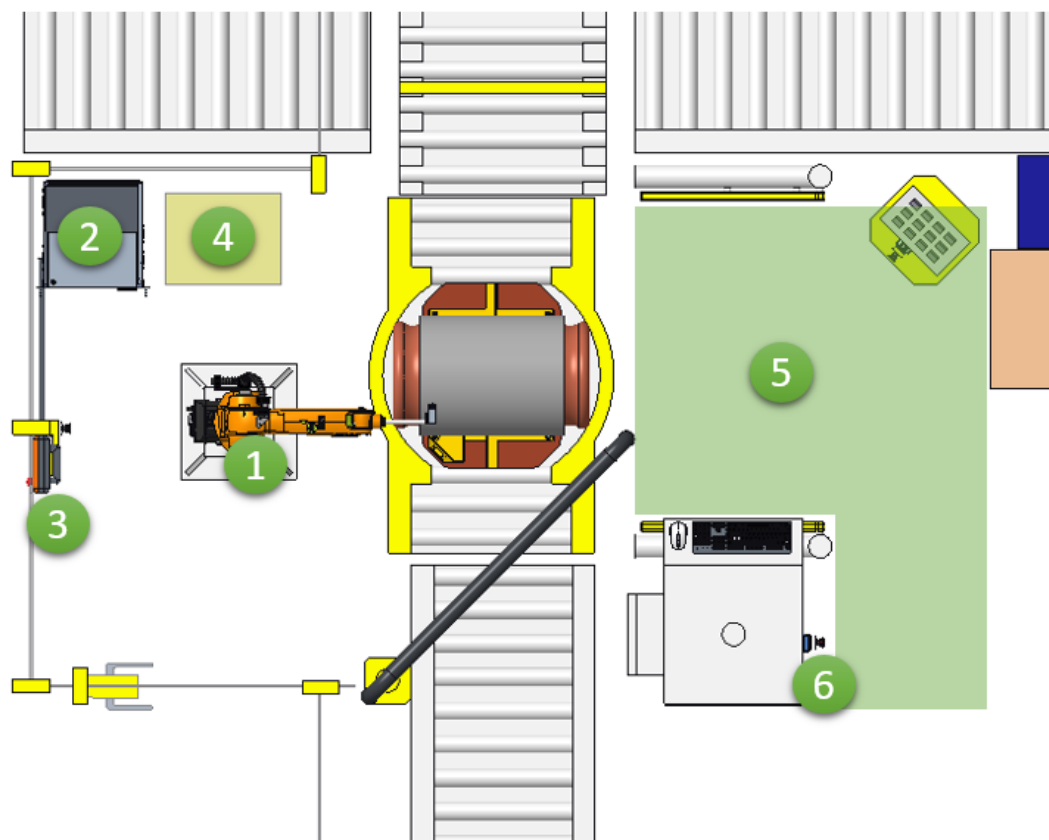


Obr. 28 Pracoviště diagnostiky původně (vlevo) a s robotem (vpravo)

Dle zadání byl využit zástavbový prostor naproti místa, kde se pohybuje operátor. Přístup k robotu je zajištěn pomocí bezpečnostních dveří a v těchto prostorách se může pohybovat pouze proškolená obsluha při přerušeném automatickém pohybu robotu.

Na Obr. 29 na další straně je vyobrazena zjednodušená dispozice diagnostického pracoviště s instalovaným robotem, číslice označují tyto pozice:

- 1 Robot Kuka
- 2 Řídicí skříň a kontrolér
- 3 Ovládací panel Kuka
- 4 Kalibrační přípravek
- 5 Oblast, ve které se pohybuje operátor při testování
- 6 Ovládací panel



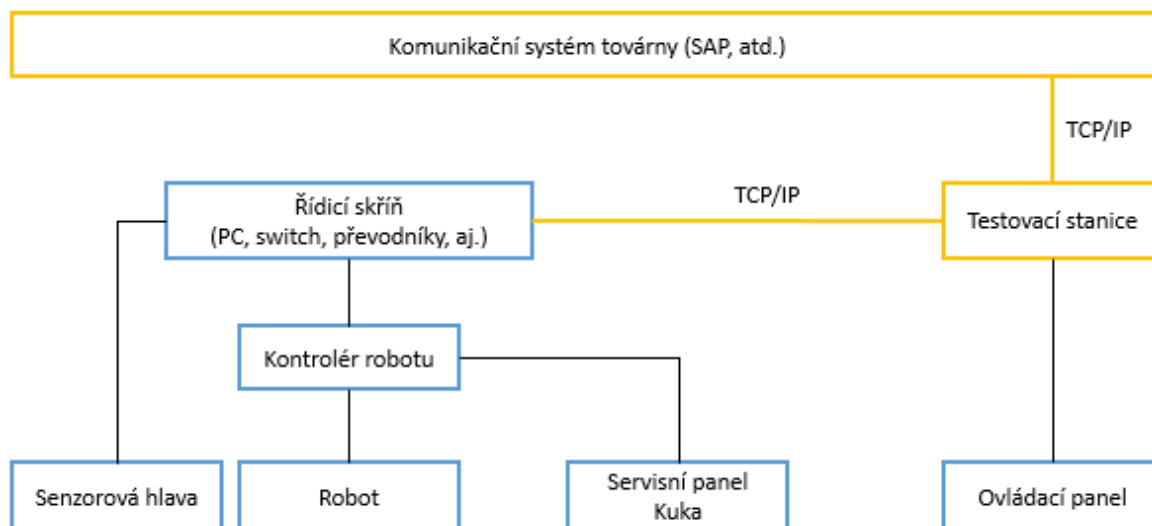
Obr. 29 Dispozice RTP

Výkres s dispozicí pracoviště a popisem všech důležitých prvků je k této práci přiložen jako příloha F. Zastavěný prostor kóje robotu je 2300 x 1325 mm.

Souřadnicový systém báze robotu byl umístěn záměrně mimo předpokládanou polohu osy statoru kvůli technickým problémům, které se vyskytly během testování. Řídicí systém se pokoušel nalézt co nejkratší cestu při přejezdech, jenže motory se při tom dostávaly do svých koncových poloh. Důsledkem bylo bezpečnostní zastavení robotu a nutné manuální navedení do výchozí pozice.

Realizaci zkoušek zajišťuje zkušební zařízení, jehož řídicí systém je konfigurován pomocí dat získávaných z nadřazeného podnikového informačního systému ERP. Zkušební zařízení je aktivním prvkem komunikace a potřebná data si vyžádá na základě identifikátoru výrobní zakázky. Tento řídicí systém bude také nadřazeným prvkem, pro parametrizaci a řízení robotu.

Datová komunikace mezi řídicími systémy a informačním systémem je realizována pomocí TCP/IP protokolu. Zjednodušené schéma komunikační vrstvy je vyobrazeno na Obr. 30.



Obr. 30 Schéma komunikace prvků pracoviště

Servisní panel robotu Kuka, neboli „teach pendant“, je přístupný pro případné potvrzení chyby či reset programu zvenčí a není nutné kvůli tomuto vstupovat dovnitř kóje robotu. Je nicméně pevně uchycen přípravkem a sundat jej lze pouze uvnitř prostoru. U teach pendantu je umístěn dokument s popisem funkcí jako spuštění, zastavení či reset zařízení, a za jakých okolností je s ním možné manipulovat. Proti neoprávněnému vstupu je zabezpečen servisním klíčem.

Operátor je na pracovišti nucen spuštění úloh robotu potvrdit stisknutím tlačítka na ovládacím panelu, který je umístěn na boku testovací stanice. Panel může obsahovat více tlačítek pro případné další funkce či přerušení/zastavení testování robotem. S řídicím systémem je propojen pomocí protokolu TCP/IP.

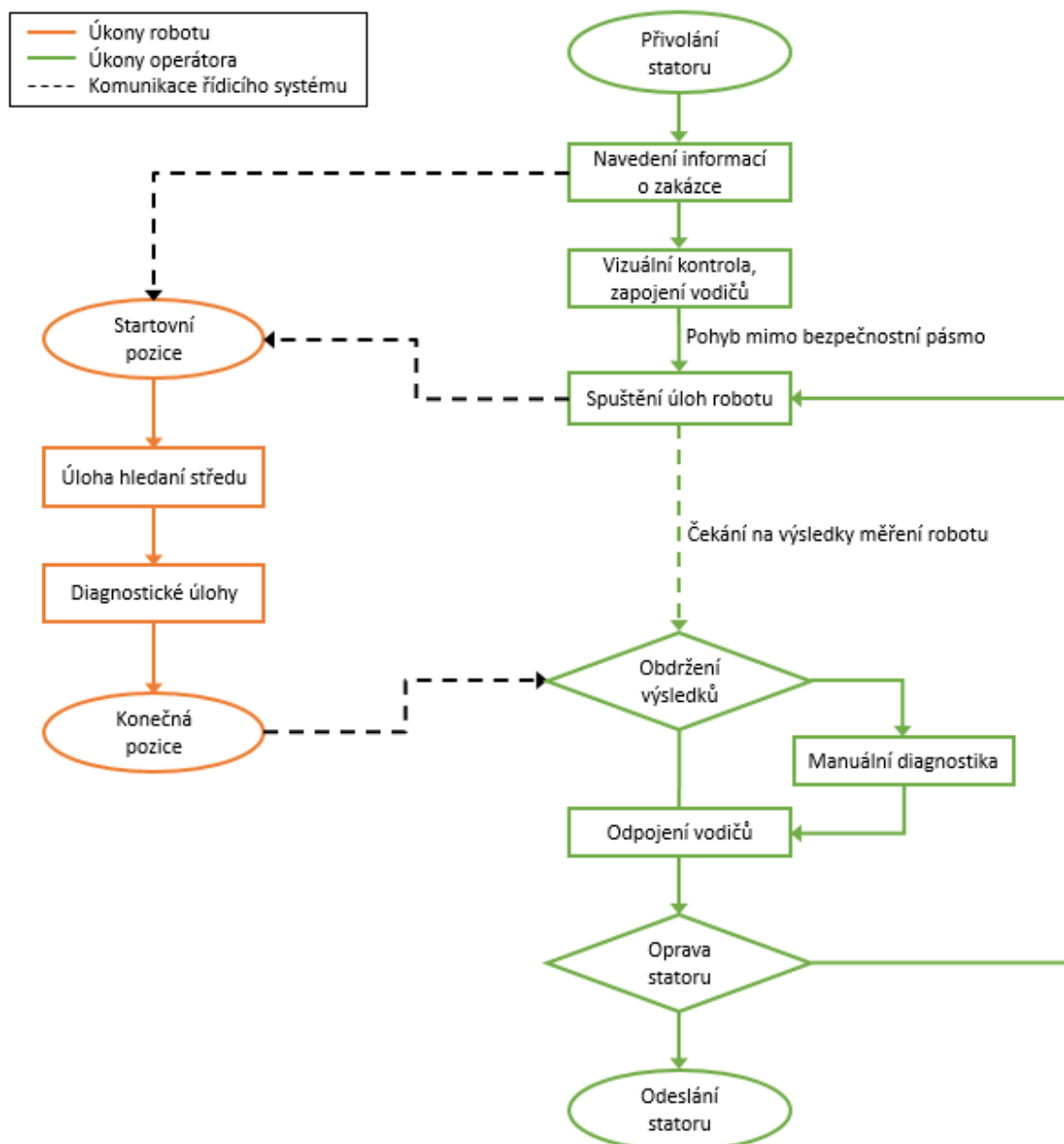
Kalibrační přípravek je nástroj sloužící pro kalibraci senzoru Keyence. Definice vlastního procesu kalibrace není součástí zadání práce, ale počítáno se jeho přítomností a nezbytností využití na pracovišti. Jelikož je samotný senzor velmi přesné a citlivé zařízení, jakékoli vlivy provozu se mohou v průběhu času projevit v podobě ztráty přesnosti. Tento přípravek by měl sloužit ke kontrole a případné kalibraci zařízení. Jeho konkrétní podoba, bude-li potřeba, se určí až na základě reálných testů v pozdější fázi přípravy pracoviště dle podnětů pracovníků specializujících se na vyhodnocování měření.

Princip fungování bude pravděpodobně postaven na ověření opakovatelnosti měření najížděním do stejné polohy s porovnáváním naměřených dat.

Bezpečnost na pracovišti a rozmístění bezpečnostních prvků je popsáno v následujících podkapitolách.

5.3 Očekávaný průběh postupu práce

Pro zajištění bezpečnosti bylo nutné stanovit postup práce operátora na pracovišti s instalovaným robotem. Diagram na Obr. 31 znázorňuje, jak by interakce mezi nimi měla probíhat.



Obr. 31 Algoritmus postupu práce na pracovišti RTP

5.4 Bezpečnost pracoviště

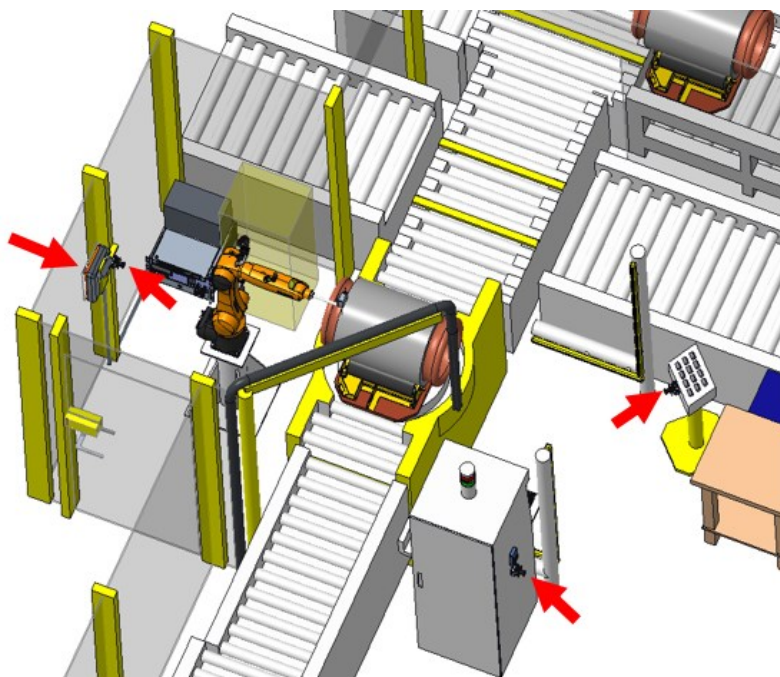
Norma pro návrh robotizovaných pracovišť ČSN EN ISO 10218-2 [7] uvádí, že části ovládacího systému vztahující se k bezpečnosti musí být navrženy tak, aby splňovaly úroveň vlastností PL dle se strukturou kategorie 3 dle ČSN EN ISO 13849-1, případně úroveň integrity SIL 2 dle ČSN EN 62061.

Při realizaci RTP je tak nutné volit a instalovat bezpečnostní prvky, u kterých výrobci přítomnost výše zmíněných úrovní garantují.

5.4.1 Pokyny pro zajištění bezpečnosti

- A. Na pracoviště diagnostiky mají přístup pouze proškolení operátoři a vstup je zabezpečen bezpečnostním zámekem. Pracoviště je od zbytku výrobní haly odděleno oplocením.
- B. Do kóje s robotem mají přístup pouze proškolení technici s autorizací provádět úpravy řídicích aplikací a také pracovníci údržby. Během jejich přítomnosti musí být postupováno dle normy ČSN EN ISO 10218-2 [7] pro zajištění jejich bezpečnosti.
- C. Robot musí mít definované softwarové pracovní zóny. Pokud se TCP robotu dostane mimo povolenou zónu, dojde k okamžitému zastavení robotu. Nebezpečné zóny musí zahrnovat jak technologii pracoviště (dopravníky, kabeláž, aj.), tak oblasti, kde by mohlo dojít ke kontaktu s obsluhou. Jakmile bude jasné ověřen a otestován pohyb robotu v průběhu jednotlivých operací, je možné první osu robotu doplnit o mechanické dorazy či koncové spínače pro zvýšení bezpečnosti dle normy ČSN EN ISO 10218-1 [6], případně je možné zakoupit balíček od firmy Kuka pro softwarovou kontrolu bezpečnostních zón spolu s bezpečnostním relé a dalšími nezbytnými prvky.
- D. Funkce nouzového zastavení robotu musí být propojena i s dalšími prvky pracoviště (dopravníky, testovací stanice atd.) a v případě sepnutí musí dojít k zastavení všech těchto prvků. Pracoviště obsahuje čtyři nouzové vypínače splňující normy ČSN EN 60204-1 a ČSN EN ISO 13850. Dva vypínače se nachází v prostoru pohybu operátora, jeden je umístěn u robotu v kóji a poslední je přístupný zvenčí vedle ovládacího panelu robotu. Využít lze také (pátý) nouzový

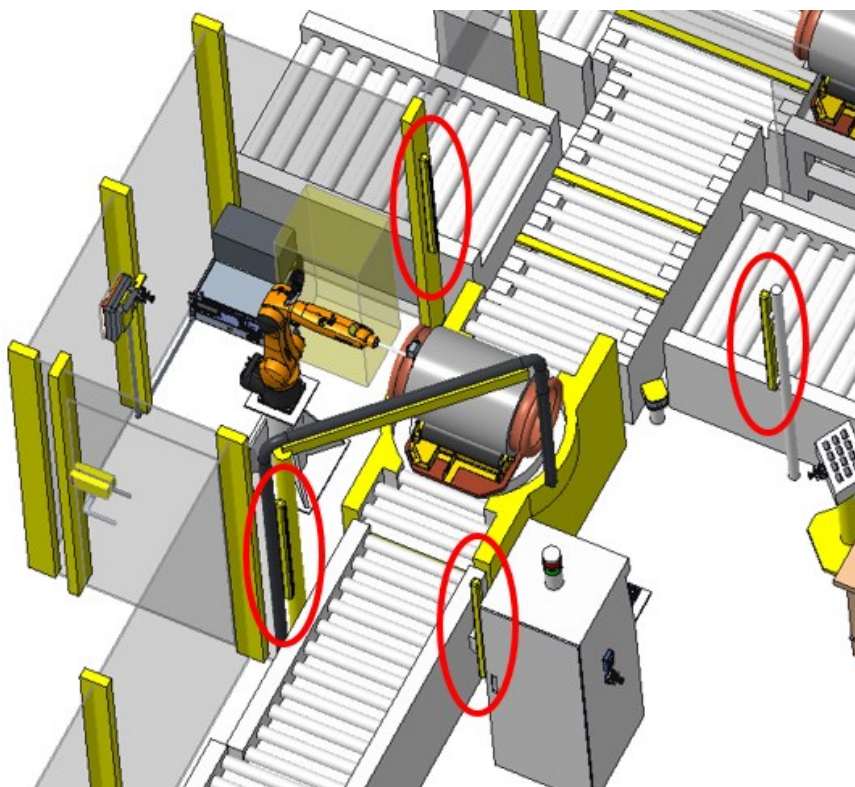
vypínač přímo na ovládacím panelu, nicméně je jednak méně viditelný, a také výrobce neuvádí, zda se jedná o dvoukanálové řešení ochrany splňující normu ČSN EN ISO 13849-1 [5] s úrovní vlastností PL d v kategorii 3.



Obr. 32 Rozmístění nouzových vypínačů

- E. Iniciování automatického režimu může být provedeno pouze povolnou osobou disponující přepínacím klíčem. Tato osoba se musí dle normy ČSN EN ISO 10128-2 [7] nacházet mimo kóji robotu, tzn. v konkrétním případě tohoto návrhu musí být ovládací panel robotu uzamčen v přípravku, kdy je k němu umožněn přístup pouze zvnějšku. Navíc, spuštění pohybu a provádění úloh robotu je nutné provést stisknutím tlačítka na ovládacím panelu umístěném na boku testovací stanice. Ovládací panel musí vyhovovat ČSN EN ISO 10128-1 [7].
- F. Elektrická instalace (včetně ovládacího panelu), ochranná vazba a funkční vazba musí splňovat požadavky ČSN EN 60204-1 [7].
- G. Kabeláž musí být vedena mimo oblast výskytu obsluhy, aby bylo sníženo riziko možného zakopnutí.
- H. Jelikož operátor i robot musí mít k testovanému statoru přístup, je nutné zabezpečit a zaručit případné zastavení robotu, přiblíží-li se operátor na jemu nebezpečnou vzdálenost. Touto problematikou se podrobně zabývá podkapitola 5.5. Dle ČSN EN ISO 13855 [8] musí být prostor spolupráce jasně definován (např. značení podlahy, návěští).

- I. Dle normy ČSN EN ISO 10218-2 [7] musí být zajištěno nouzové zastavení robotu v případě, kdy by se někdo pokoušel obejít zabezpečení i v nepravděpodobném prostoru. Na Obr. 33 je naznačeno řešení pomocí světelných závor, které zajistí bezpečné zastavení robotu, pokoušel-li by se k němu někdo dostat cestou přes dopravník. Takové jednání je ovšem velmi nepravděpodobné, nemělo by však být opomenuto a jeho realizace závisí na konzultacích integrátora s pracovníky bezpečnosti závodu.



Obr. 33 Doporučené rozšíření zabezpečení pracoviště o více světelných závor

- J. Dle normy ČSN EN ISO 10218-2 [7] je nutné vypracovat plán postupu pro úvodní spuštění, verifikaci a validaci funkcí systému a provést záznam. Je nezbytné vytvořit dle zmíněné normy také návod k použití, až bude známa konkrétní podoba systému před jeho integrací.
- K. Před integrací je nutné opět provést posouzení rizik, jelikož je jisté, že některé komponenty se změní ať už svou podobou či funkcí (např. koncový efektor se snímači), tak i svým rozmístěním v pracovišti.

5.4.2 Údržba RTP, úprava řídicí aplikace robotu

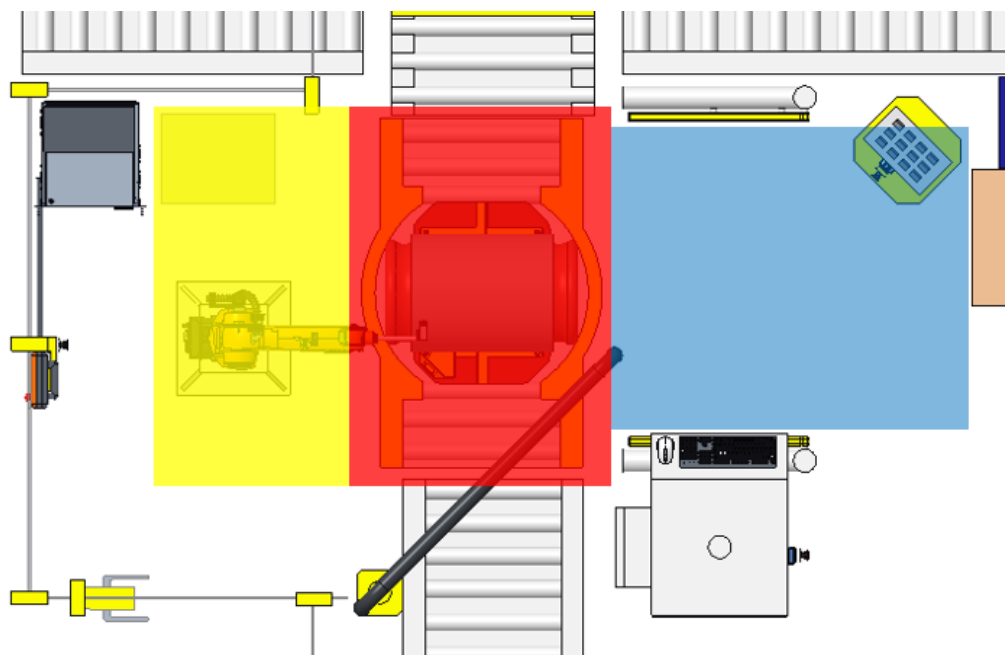
Pro zajištění trvalého funkčního a bezpečného provozu RTP je nutné provádět údržbu a opravu systému. Může být rovněž vyžadováno upravit řídicí aplikaci ať již na základě optimalizace, změny produktů apod.

Pokyny pro údržbu RTP musí být obsaženy v návodu k použití. Údržba samotného robotu je specifikována výrobcem v manuálech na stránkách firmy Kuka [1]. Kontrola funkčnosti jednotlivých prvků, především bezpečnostních, musí podléhat doporučením výrobců těchto zařízení.

Norma ČSN EN ISO 10218-2 [7] také umožňuje pozastavení bezpečnostních zařízení například k učení robotu. Je-li taková situace vyžadována, je nutné postupovat pro zajištění bezpečnosti pracovníků provádějících údržbu dle doporučení dané normy.

5.5 Bezpečnost pracovního prostoru spolupráce

Pracovní prostor spolupráce, tedy místo, kde operují robot i operátor, je vyznačen na Obr. 34. Operátor se pohybuje v modré zóně, robot ve žluté a červená zóna je sdílená. Pro zajištění bezpečnosti je nutné určení rozměrů těchto zón pro pozdější použití při programování bezpečnostních zařízení.



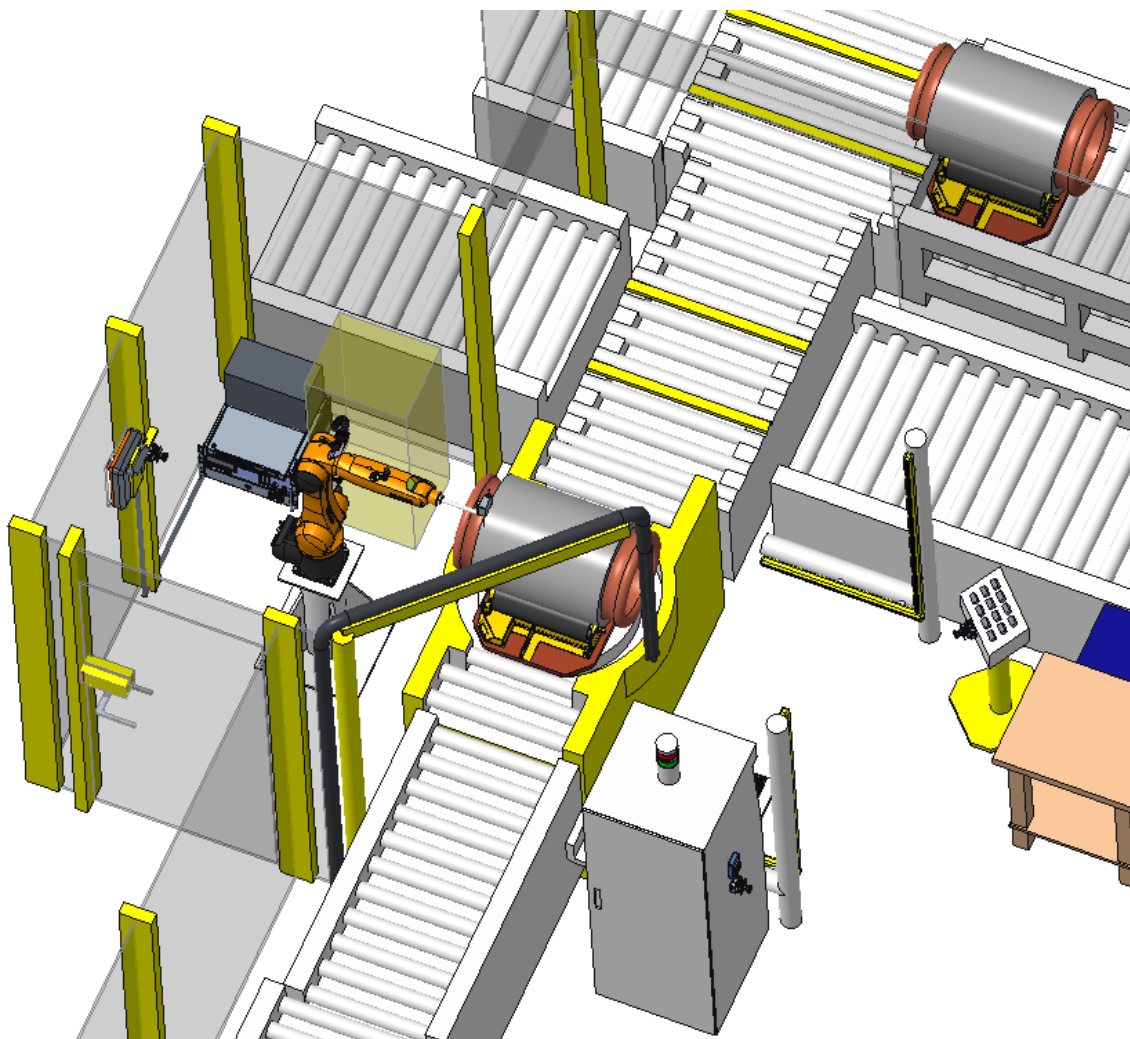
Obr. 34 Rozdělení pracovních prostorů robotu a operátora

V této kapitole jsou navržena dvě řešení s rozdílným přístupem. Varianta A v podobě užití optických závor plní jednoduchou funkci, kdy při narušení snímaného prostoru dojde k zastavení práce robotu. Pokračování je možné, jakmile operátor prostor opustí a stiskne potvrzovací tlačítko na ovládacím panelu pro pokračování.

Varianta B uvažuje s nasazením laserového skeneru, který by snímal prostor určený pro operátora. Výhodou řešení jsou menší zástavbové rozměry a možnost užití zón, kdy by robot při přiblížení zpomalil na bezpečnou rychlost a zastavil se až v případě, že se operátor dostane na již pro něj nebezpečnou vzdálenost.

5.5.1 Varianta A – optické senzory

Optické bezpečnostní snímače představují spolehlivou a častě používanou ochranu. Navržen je podobný systém dvou párů snímačů rozmístěných ve tvaru L, který již obdobně funguje na sousedním zkušebním pracovišti.



Obr. 35 Zabezpečení – varianta A: optické snímače

Byly zvoleny světelné závory zavedeného výrobce Keyence s rozlišením 25 mm. Pro vertikální uložení byl zvolen typ GL-R72H [9] s detekční zónou délky 1420 mm a pro horizontální uložení ve výšce 300 mm nad podlahou typ GL-R40H s detekční zónou délky 780 mm.

Tab. 22 Parametry optických snímačů Keyence GL-RxxH [9]

Parametr	Hodnota
Rozlišení mezi paprsky	25 mm
Délka	1440 mm / 800 mm
Funkční délka	1420 mm / 780 mm
Zdroj světla	Infračervená LED
Rychlost odezvy On → Off	17.8 ms
Napájení	24 V _{DC}
Normy a certifikace	SIL3, PLe
Orientační cena dvou párů senzorů	25 000 Kč

Dle normy ČSN EN ISO 13855 [8] je nutné při užití optických snímačů zkontrolovat navrženou bezpečnou vzdálenost výpočtem dle vzorce pro detekční zónu kolmou ke směru přístupu:

$$S = (K \cdot T) + 8 \cdot (d - 14) \quad (1)$$

kde:

- S – minimální bezpečná vzdálenost (mm),
- K – stanovený parametr pro přiblížení lidského těla ($K = 1600$ mm/s),
- T – doba doběhu zohledňující čas mezi sepnutím bezpečnostního prvku a zastavením stroje (s),
- d – rozlišení snímače ($d = 25$ mm).

Výpočet doby doběhu T [8]:

$$T = t_1 + t_2 \quad (2)$$

kde:

- t_1 – čas mezi sepnutím snímače a nastavením výstupního signálu snímače do polohy Off,
- t_2 – čas mezi nastavením výstupního signálu snímače a zastavením nebezpečného stroje.

Jako vyhodnocovací zařízení byl zvolen bezpečnostní kontrolér Keyence SC-S11, který má časovou rychlost odezvy On \rightarrow Off o délce 25 ms [10].

V katalogu robotu Kuka KR10 R1100 sixx ze stránek výrobce je uvedeno, že při aktivaci bezpečnostního zastavení kategorie 0 (nouzové zastavení) dojde k zabrzdění jako poslední druhé osy robotu s dobou doběhu 0,647 s [1]. Tento údaj se vztahuje k plnému vyložení ramene robotu při maximální rychlosti v automatickém režimu a s objektem manipulace maximální hmotnosti. V tomto režimu nebude robot v řešeném případě nikdy operovat – rychlost bude přizpůsobena sensorové hlavě s citlivou sensorikou, příliš vysoká rychlost by rovněž zavedla nepřesnost do samotného měření a vyhodnocování. Nepředpokládá se, že by sensorová hlava překročila hmotnost poloviční z celkové nosnosti a také pohyby s plně vyloženým ramenem v současné době nejsou plánovány. Doba doběhu tak byla pro výpočet v dalším kroku určena odhadem při uvažování bezpečné rezervy na hodnotu 0,4 s.

Výpočet doby doběhu T v řešeném případě zahrnující čas sepnutí senzoru, bezpečnostního relé a vypnutí pohonů robotu:

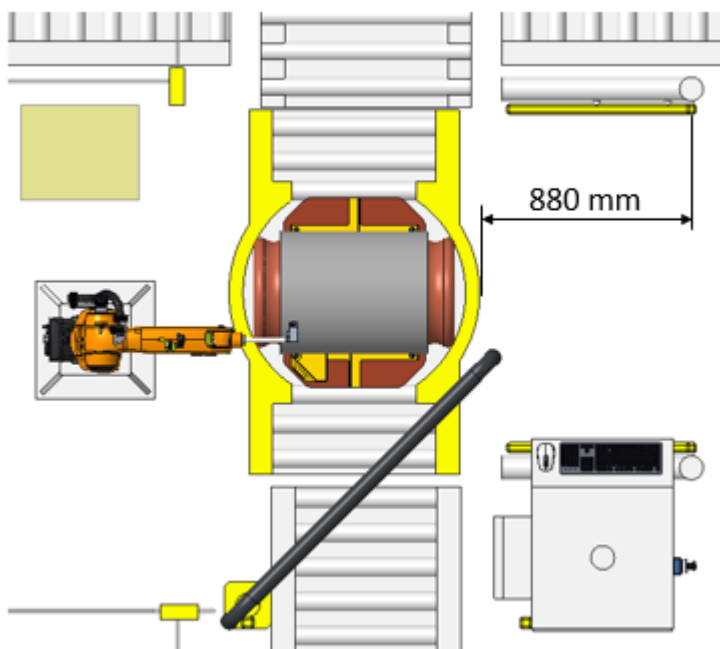
$$T = 17,8 + 25 + 400 = 442,8 \text{ ms} \approx 0,45 \text{ s} \quad (3)$$

Výpočet minimální bezpečné vzdálenosti S :

$$S = (1600 \cdot 0,45) + 8 \cdot (25 - 14) = 808 \text{ mm} \quad (4)$$

Jelikož by světelné závory ve výpočtové vzdálenosti zavázely při práci na testovací stanici, byla navýšena bezpečná vzdálenost na 880 mm. Pokud operátor při vykonávání pohybu robotu do oblasti vstoupí, dojde k zastavení robotu.

Kvůli riziku v podobě zkoušek vysokým napětím je minimální vzdálenost měřena již od otočného stolu, v jehož blízkosti se nachází kabeláž k buzení statoru. Avšak v současné době mají operátoři ke statoru volný přístup i při VN zkoušce, je tedy na zvážení pracovníků bezpečnosti podniku, zda je toto riziko i v případě RTP akceptovatelné, a pokud ano, je možné zkrácení zabezpečeného prostoru.

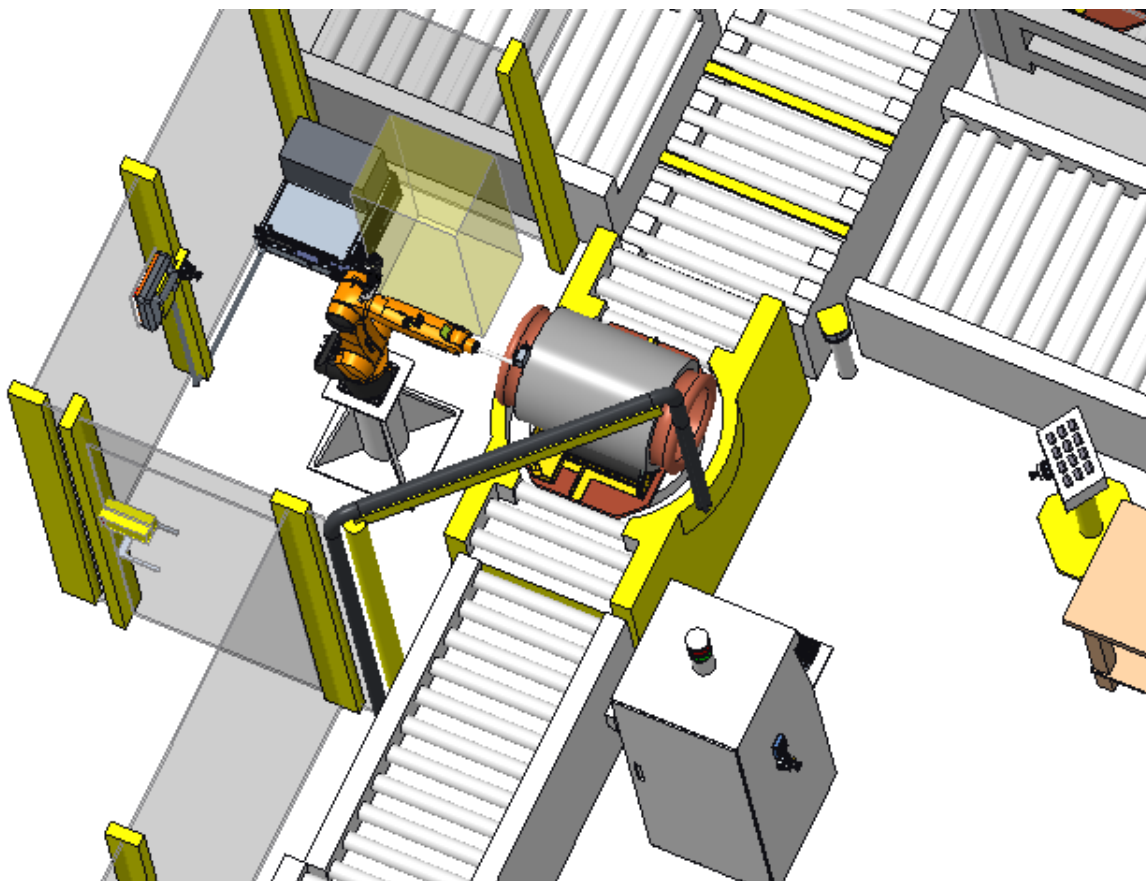


Obr. 36 Zvolená vzdálenost světelných závor od nebezpečné zóny

Pro vertikálně umístěný pár optických snímačů musí být nejmenší vzdálenost mezi podlahou a prvním paprskem menší než 300 mm dle ČSN EN ISO 13855 [8].

5.5.2 Varianta B – laserový skener

Laserový skener představuje dražší variantu zabezpečení, nicméně mnohem lépe přizpůsobitelnou. Jeho umístění znázorněné na Obr. 37 zajišťuje pokrytí celého prostoru spolupráce. Výhodou je možné rozdělení snímaného prostoru do zón, což lze nyní využít ke zpomalení robotu a pozdějšímu zastavení.



Obr. 37 Zabezpečení – varianta B: laserový skener

Pro zajištění bezpečnosti byl zvolen laserový skener společnosti Keyence SZ-04M [11], který nastavení zón podporuje.

Tab. 23 Parametry laserového skeneru Keyence SZ-04M [11]

Parametr	Hodnota
Rozlišení ochranné zóny	1,2 m až 4,2 m dle velikosti a polohy objektu
Rozlišení varovné zóny	3 m až 10 m dle velikosti a polohy objektu
Detekční úhel	270°
Zdroj světla	Infračervená LED
Rychlost odezvy On → Off	33 ms/1 sken (pro 4 skeny tj. 132 ms)
Napájení	24 V _{DC}
Normy a certifikace	SIL2, PLd
Orientační cena	125 000 Kč

Dle normy ČSN EN ISO 13855 [8] je nutné při užití optických snímačů zkontrolovat navrženou bezpečnou vzdálenost výpočtem dle vzorce pro detekční zónu rovnoběžnou se směrem přístupu:

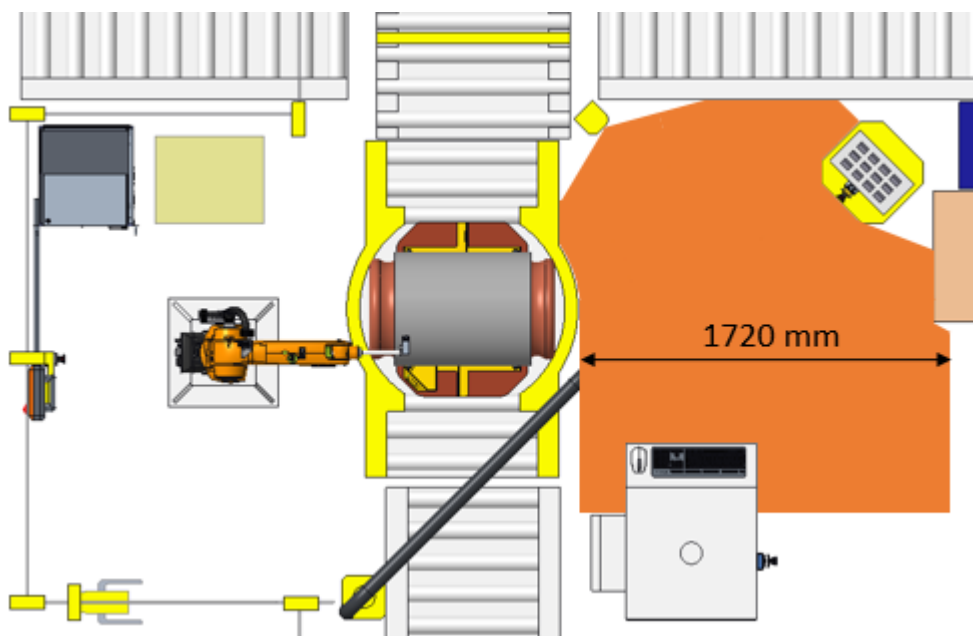
$$S = (K \cdot T) + (1200 - 0,4 \cdot H) \quad (5)$$

kde:

- S – minimální bezpečná vzdálenost (mm),
- K – stanovený parametr pro přiblížení lidského těla ($K = 1600$ mm/s),
- T – doba do běhu zohledňující čas mezi sepnutím bezpečnostního prvku a zastavením stroje (s),
- H – vzdálenost detekční roviny od podlahy (voleno $H = 500$ mm).

$$S = (1600 \cdot 0,45) + (1200 - 0,4 \cdot 500) = 1720 \text{ mm} \quad (6)$$

Pokud se operátor dostane do oblasti naznačené na Obr. 38 oranžovou barvou, dochází k okamžitému zastavení robotu.



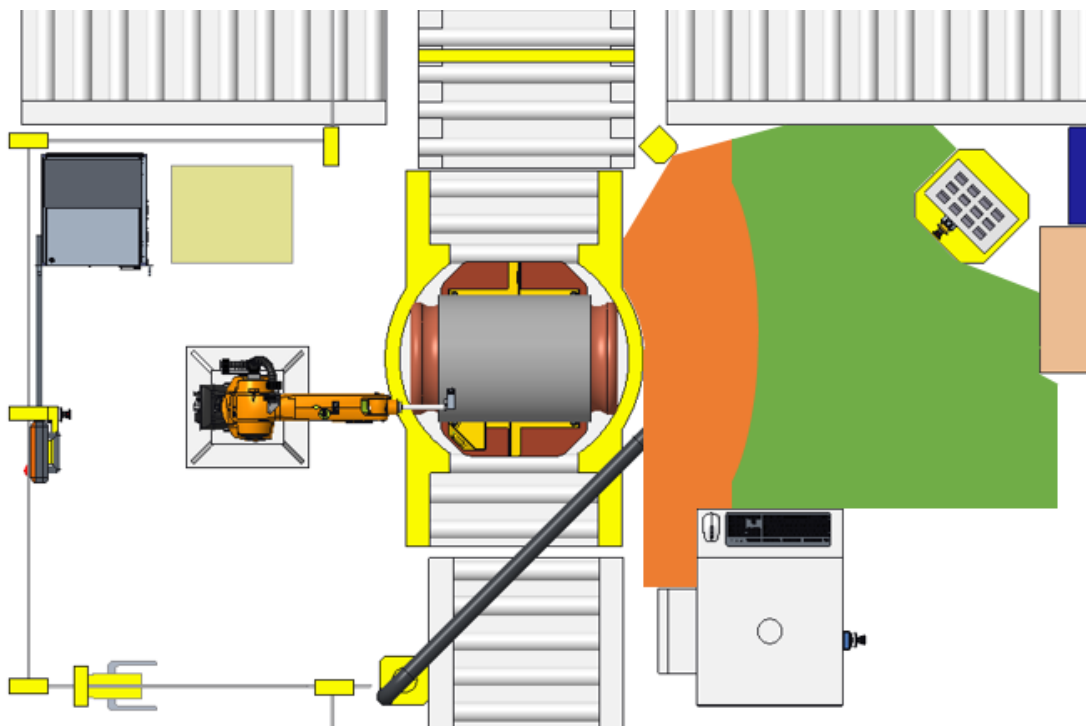
Obr. 38 Snímaný prostor laserovým skenerem

V budoucnu lze uvažovat o spolupráci robotu s operátorem, bylo-li by to z hlediska možných diagnostických testů satorových svazků vyžadováno. Přeprogramováním

laserového skeneru by mohlo být pracoviště jednoduše přepracováno do podoby kolaborativního pracoviště dle technické specifikace ISO/TS 15066.

Normy ČSN EN ISO 10218-1 a ČSN EN ISO 10218-2 zmiňují možnost rozdělení pracovního prostoru na zóny. Na Obr. 39 je znázorněn prostor snímáný laserem ve dvou barvách. Pokud by například obsluha vstoupila do zelené oblasti, došlo by ke snížení rychlosti robotu na bezpečnou hodnotu 250 mm/s. Robot by se zastavil až poté, co by se operátor dostal do oranžové oblasti.

Opuštění zelené oblasti by opět vedlo k navýšení rychlosti robotu. Dle ČSN EN ISO 10218-2 se jedná o bezpečnostní monitorované zastavení. Pohyb v zelené oblasti by měl být signalizován zvukovým upozorněním.



Obr. 39 Rozdělení prostoru spolupráce na zóny

5.5.3 Srovnání navržených variant

Zadavatel může posoudit při konzultaci se systémovým integrátorem, k jakému řešení ze dvou nabízených variant zabezpečení se přikloní. Obě splňují základní bezpečnostní funkci. Náklady na variantu s laserovým skenerem jsou o cca 100 000 Kč vyšší, bonusem je však možné budoucí využití více detekčních zón či koncept kolaborativního pracoviště dle technické specifikace ISO/TS 15066.

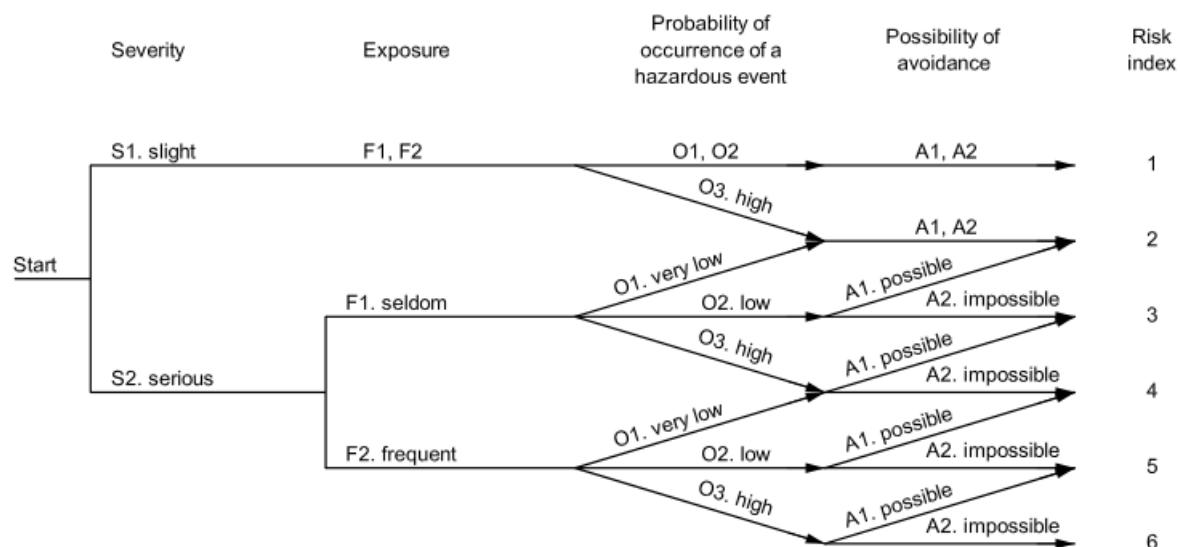
Prozatím nejsou známy všechny konkrétní úlohy robotu při diagnostice statorových svazků, není tak možné objektivně posoudit a vybrat optimální variantu.

5.6 Posouzení rizik

Nezbytnou součástí návrhu robotizovaného pracoviště je dokumentace s posouzením rizik dle normy ČSN EN ISO 12100 [12], k diplomové práci je přiložena jako příloha G. Rizika byla identifikována pro dva provozní stavy pracoviště – provoz a údržba (včetně možnosti aktualizace řídicích aplikací).

Pro postup byly užity metodiky z výše zmíněné normy, které jsou také popsány v technické zprávě ISO/TR 14121-2 [13]. Pro identifikaci rizika se konkrétně jedná o kombinaci dvou doplňujících se přístupů – bottom-up, kdy je prvně určeno nebezpečí a dále jsou rozebrány jeho možné příčiny – a top-down, kdy je definováno zranění a pátrá se po okolnostech, které jej mohlo způsobit.

Pro ohodnocení rizika a jeho snížení byla užita metoda Risk Graph, kdy je každé riziko analyzováno ve čtyřech krocích a je mu přiřazen Risk index. Následně dochází k návrhu snížení rizika a ohodnocení tohoto návrhu. Na základě srovnání hodnocení je rozhodnuto, zda je snížení rizika dostatečné.



Obr. 40 Graf rizika pro jeho ohodnocení [13]

Postup ohodnocení metodou Risk Graph je vyobrazen na Obr. 40. Pokud nabyde výsledný Risk index hodnotu:

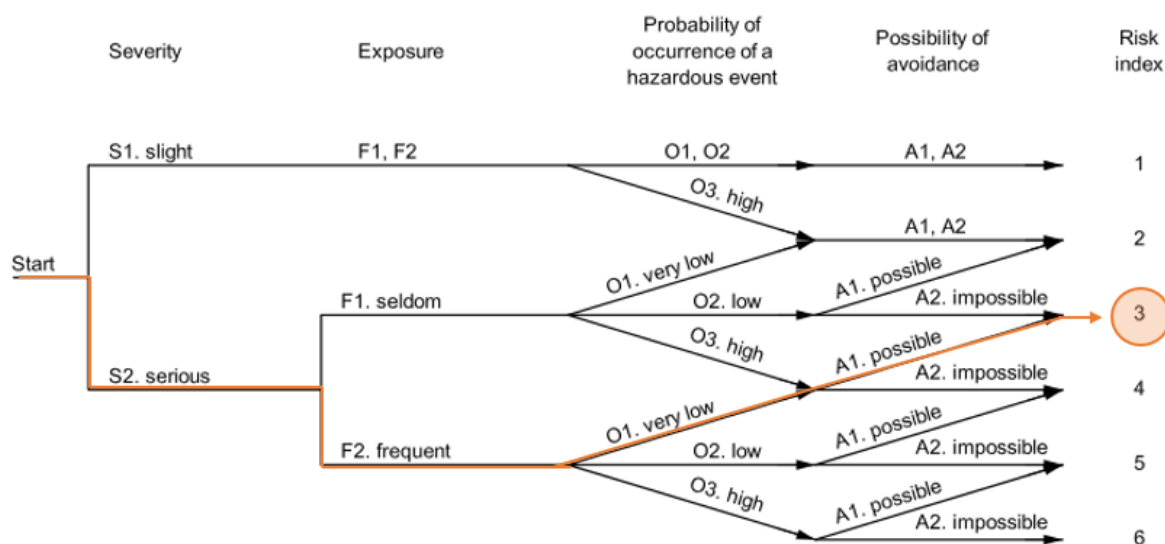
- 1 nebo 2: je vyžadován zásah pro redukci rizika s menší prioritou,
- 3 nebo 4: je vyžadován zásah se střední prioritou,
- 5 nebo 6: je vyžadován zásah s vysokou prioritou pro nutné snížení rizika.

Vysvětlení pojmů z Obr. 40:

- Severity – závažnost
 - Slight – lehká
 - Serious – vážná
- Exposure – ohrožení nebezpečím
 - Seldom – zřídka
 - Frequent – často
- Probability of occurrence of a hazardous event – pravděpodobnost výskytu hazardní situace
 - Very low – velmi nízká
 - Low – nízká
 - High – vysoká
- Possibility of avoidance – možnost vyhnout se riziku
 - Possible – možné
 - Impossible – nemožné

Nechť je příkladem ohodnocení rizika zakopnutí o kabeláž vedoucí středem pracoviště a přivodění si následkem pádu úraz v podobě zlomené horní končetiny:

- Závažnost (severity): vážná (serious) → S2
 - Pracovník musí nastoupit na nemocenskou
- Ohrožení (exposure): často (frequent) → F2
 - Kabeláž je na daném místě neustále
- Výskyt (occurrence): nízká (very low) → O1
 - Pracovník je o riziku proškolen, dává při chůzi po pracovišti pozor
- Vyhnutí (avoidance): možné (possible) → A1
 - Změna vedení kabeláže



Obr. 41 Ohodnocení rizika zakopnutí s následkem zlomení ruky

Výsledkem je index rizika hodnoty 3, je tak vhodné se snížením rizika zabývat a řešit jej například návrhem vedení kabeláže ne přes střed pracoviště, ale po stranách v liště. Po návrhu snížení rizika dochází k opětovnému ohodnocení sníženého rizika a rozhodnutí, zda je snížení dostatečné.

V analýze rizik v příloze G jsou brány v úvahu obě možná řešení detekční bezpečnostní zóny (tj. rovnoběžné i kolmé se směrem přiblížení obsluhy), jejíž varianty byly navrženy v podkapitole 5.5. Není uvažována varianta kolaborativní úlohy – pokud je obsluha detekování světelnými závory nebo laserovým skenerem, dojde k pozastavení automatického režimu pracoviště.

5.7 Doplnující informace

Předpokládaná doba realizace je 6 měsíců. Období, kdy by diagnostické pracoviště fungovalo v omezené míře při stálé výrobě, je odhadováno na 1 až 2 měsíce.

Po zaběhnutí a úvodním testování diagnostického pracoviště s instalovaným robotem je plánována jeho integrace do plného výrobního procesu. Pracovištěm by tak procházely všechny statorové svazky, ne pouze namátkově kontrolované nebo ty vykazující vadu na jiném pracovišti. To by mohlo vést k výrazným úsporám výrobních nákladů při zachycení vadných svazků mnohem dříve, než je tomu doposud.

Díky robotizaci lze také předpokládat uvolnění časové kapacity pracovníka diagnostiky, který by se mohl věnovat např. administrativní činnosti pracoviště. Značně sníženo bude také riziko úrazu pracovníka.

Návratnost investice je odhadována dobu na 5 až 6 let.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývala rozбором výrobního procesu diagnostiky statorových svazků v odštěpném závodě Elektromotory Frenštát, Siemens s. r. o. a možnostmi jeho robotizace.

Po analýze postupu při diagnostice jednotlivých svazků byly navrženy varianty řešení pro nalezení středové osy vnitřní válcové části statoru za předem definovaných podmínek. Zvolenou variantou bylo užití laserového snímače vzdálenosti jako součást sensorické hlavy robotu. Úloha nalezení středové osy statoru byla simulována, a po zakoupení potřebných komponent, především robotu a senzoru vzdálenosti, také prakticky otestována s pozitivním výstupem. Metodika poskytuje spolehlivé výsledky a splnila všechny požadavky zadání, především pak nepřekročení limitu maximálního intervalu trvání operace a zajištění přesnosti. Zadavatel práce tak může dále pracovat na vyhodnocování měření a integraci potřebných snímačů k diagnostice statorů do sensorové hlavy.

Dalším bodem práce byla integrace robotu do výrobního procesu, v rámci čehož bylo navrženo pracoviště diagnostiky s instalovaným robotem a dalšími nezbytnými funkčními prvky. Návrh obsahuje doporučení týkající se zajištění bezpečnosti, rozmístění bezpečnostních prvků a také dokumenty s posouzením rizik robotizovaného pracoviště diagnostiky statorových svazků.

V budoucnu je po zaběhnutí pracoviště plánována kontrola všech vyráběných statorových svazků s cílem zvýšit kvalitu výroby i samotného procesu mezioperační kontroly, dále zvýšit automatizaci měření a snížit rizika práce. Průmyslový robot rovněž otevírá možnosti rozšíření diagnostických testů, jako jsou například testy geometrie v současné době prováděné manuálně a pouze u tzv. dozorovaných motorů.

Seznam použité literatury

- [1] KR Agilus. *KUKA AG* [online]. Augsburg: KUKA Roboter, 2017 [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-agilus>
- [2] Kuka KR C4. *Kuka AG* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/robot-controllers/kr-c4>
- [3] LK-G157 – Sensor Head. *Keyence Corporation* [online]. 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g157/index.jsp>
- [4] Specifications cDAQ™-9189. *National Instruments* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376607a.pdf>
- [5] ČSN EN ISO 13849-1. *Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnost částí ovládacích systémů – Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 84 s. Třídící znak 83 3205.
- [6] ČSN EN ISO 10218-1. *Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 44 s. Třídící znak 18 6502.
- [7] ČSN EN ISO 10218-2. *Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Systémy robotů a integrace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 68 s. Třídící znak 18 6502.
- [8] ČSN EN ISO 13855. *Bezpečnost strojních zařízení – Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 40 s. Třídící znak 83 3303.
- [9] GL-R72H – Main Unit, Hand Protection Type. *Keyence Corporation* [online]. 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/safety/light-curtain/gl-r/models/gl-r72h/index.jsp>
- [10] SC-S11 – Safety Controller – SC series. *Keyence Corporation* [online]. 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/safety/e-stop-controller/sc/specs/index.jsp>
- [11] SZ-04M – Main Unit, Multi-function Type. *Keyence Corporation* [online]. 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/safety/laser-scanner/sz/models/sz-04m/index.jsp>
- [12] ČSN EN ISO 12100. *Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 106 s. Třídící znak 83 3001.

-
- [13] ISO/TR 14121-2. Safety of machinery – Risk assessment – Part 2: Practical guidance and examples of methods. Geneva: ISO, 2007. 71 s.

Bibliografie

LEINVEBER, J. *Strojnické tabulky*. Páté vydání. Úvaly: Albra, 2011, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.

KOLÍBAL, Z. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně – nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

Přílohy

- Příloha A:** **CD médium – diplomová práce a přílohy v elektronické podobě**
- Příloha B: Schéma zapojení testovací aplikace [výkres, CD]
- Příloha C: Program KRL testovací úlohy (soubory KRL_test.dat a KRL_test.src) [CD]
- Příloha D: Soubor VCMX se simulací testovací úlohy [CD]
- Příloha E: Video se simulací testovací úlohy [CD]
- Příloha F: Dispozice navrženého RTP diagnostiky statorových svazků [výkres, CD]
- Příloha G: Posouzení rizik RTP diagnostiky statorových svazků [dokumentace, CD]
- Příloha H: CAD soubory navrženého RTP diagnostiky statorových svazků [CD]
- Příloha I: CAD soubory testovacího pracoviště [CD]

Poděkování

Děkuji panu Ing. Václavu Krysovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a informací při vedení diplomové práce. Děkuji společnosti o. z. Elektromotory Frenštát, Siemens s.r.o. a především panu Ing. Jiřímu Pospíšilíkovi, Ph.D. za příležitost tuto práci vypracovat na základě jejich zadání a podpory při tvorbě diplomové práce. Děkuji rovněž Mgr. Lukáši Adamcovi za softwarovou podporu v oblasti programování v LabVIEW™.